

**Maria Dulce Cordeiro Moreira**

***Questionar/Investigar***

Algumas experiências de preparação e  
implementação de aulas sobre o tema Ondas e Som



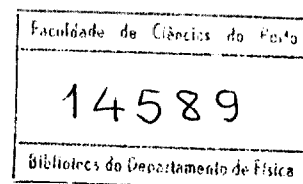
**Departamento de Física  
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto**

**Maio de 2007**

**Maria Dulce Cordeiro Moreira**

**Questionar/Investigar**

Algumas experiências de preparação e  
implementação de aulas sobre o tema Ondas e Som



*Tese submetida à Faculdade de Ciências da Universidade do Porto para a  
obtenção do grau de Mestre em Física para o Ensino*

**Departamento de Física  
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto**

**Maio de 2007**

*10 Presidente do Júri,*

*Paulo Gomes Carvalho.*

## *Agradecimentos*

Quero começar por agradecer à minha orientadora Professora Doutora Maria do Céu Marques, por toda a sua colaboração, amizade, ajuda e disponibilidade que sempre me mostrou ao longo da realização deste trabalho. Muito obrigado pelas suas palavras de incentivo, pela sua boa disposição e pelos nossos momentos de conversa que foram para mim, sem sombra de dúvida, extremamente enriquecedores.

Gostaria, ainda de agradecer ao Professor Doutor Manuel J.B. Marques pela sua disponibilidade para o esclarecimento de dúvidas que me foram surgindo aquando da elaboração deste trabalho, ajudando-me a interpretar algumas situações e resultados experimentais que por vezes me pareceram contraditórios ou simplesmente inesperados.

Quero, também, agradecer aos meus pais, irmãos e amigos que sempre me apoiaram, durante estes últimos dois anos, dirigindo-me palavras de estímulo e de carinho, ouvindo as minhas interrogações e, acima de tudo, fazendo-me ter energia para prosseguir com o meu trabalho, mesmo quando as forças escasseavam.

## *Resumo*

Neste trabalho apresenta-se uma proposta de abordagem no ensino da temática das Ondas e do Som centrada no desenvolvimento de algumas actividades experimentais e na sua exploração em sala de aula, estimulando os alunos a uma participação activa, levando-os a “questionar-se/investigar”. Considera-se que este tipo de metodologia permite aos alunos pôr à prova as suas ideias iniciais e a sua consistência científica, substituindo estas, quando necessário, por conceitos cientificamente correctos.

Foram desenvolvidas as seguintes actividades: “*A propagação do som*”, “*A velocidade de propagação do som no ar*” e ainda uma actividade intitulada “*Estudo do Efeito Doppler em situações do quotidiano*”.

O processo seguido em cada uma das actividades escolhidas foi o seguinte: Numa primeira fase procedeu-se à preparação da actividade, ao estudo do contexto científico em que se insere, bem como à escolha do contexto problemático mais adequado para a sua apresentação. Seguiu-se uma fase de pré-laboratório em que os alunos foram confrontados com algumas questões relevantes sobre determinados conceitos e situações que têm lugar no seu dia a dia, e levados a colocar hipóteses para testar posteriormente, assim como a explicitar algumas das suas ideias prévias sobre determinado conceito ou situação. Ao permitir identificar as questões centrais e antever algumas das dúvidas e dificuldades, este trabalho prévio foi muito útil na preparação da fase seguinte, a realização da actividade com os alunos. De cada uma das aulas foi feito um relato, no qual se incluiu o registo de afirmações e previsões consideradas pertinentes ou curiosas. Este registo permitiu, finalmente, tirar conclusões sobre a eficácia da metodologia e estratégias utilizadas.

Uma análise global à forma como decorreram as actividades planeadas e apresentadas ao longo desta dissertação permite concluir sobre o interesse do tipo de abordagem, fornece pistas sobre formas eficazes de ultrapassar alguns problemas, ao mesmo tempo que evidencia a dificuldade na ultrapassagem de certas ideias prévias, por parte de alguns alunos, apesar da diversidade de estratégias utilizadas.



## *Abstract*

The cornerstone of this project is an approach hypothesis on the teaching of "Waves and Sound" centred on experimental activities and their exploration in the classroom. The goal is to stimulate the students to adopt a more active participation while leading them to question themselves and investigate. It is considered that this type of methodology allows students to put to the test some of their initial ideas and their scientific awareness replacing them with scientifically correct concepts, when necessary.

The following activities were put into practice: "*Sound Propagation*", "*Sound Propagation Speed*" and an activity entitled "*Studies on Doppler Effect in Everyday Situations*".

The process pursued in each of these chosen activities was the following: in a first stage the activity was prepared, the scientific context in which it fits in was studied and the problematic context for it to be presented was also selected. A pre-laboratory stage came next in which all the students were faced with some relevant questions on certain concepts and everyday situations. Then they were challenged to propose hypothesis to test them afterwards as well as explaining some of their previously established ideas on a determined concept or situation. By allowing them to identify some of the core questions and foresee some of the doubts and difficulties, this previous work was very useful in the preparation of the next stage: doing the activity with the students. A report on each of the classes was put together. A record of all statements and predictions that had been considered relevant or liable to raise curiosity was included. This record allowed us to draw conclusions regarding the efficiency of the adopted methodologies and strategies.

A global analysis to the way the activities were planned, presented and put into practice during this dissertation allows us to draw conclusions on the level of interest of this sort of approach. It also allows us to pick up some clues on efficient means to overcome some of the problems and highlight the level of difficulty felt by some of the students in overcoming certain previously established ideas regardless of the diversity in the adopted strategies.

## *Résumé*

Dans ce travail, on présente une proposition d'approche en ce qui concerne l'enseignement du thème des Ondes et du Son centre dans le développement de quelques activités expérimentales et dans son exploration pendant les cours, stimulant les élèves à une participation active les conduisant à "se questionner/faire des recherches". On considère que ce genre de méthodologie permet aux élèves de mettre à l'épreuve leurs idées initiales et leur consistance scientifique en remplaçant celles-ci, quand il s'avère nécessaire, par des concepts scientifiqument corrects.

On a suivi le procédé suivant en chacune des activités choisies: Dans un premier moment on a procédé à la préparation de l'activité, à l'étude de la contextualization scientifique dans laquelle l'activité s'intègre, et aussi au choix de la contextualization problème la plus adéquate à sa présentation.

Um moment pré-laboratoire a suivi pendant lequel les élèves ont été confrontés à quelques questions pertinentes sur quelques concepts et situations qui ont lieu dans leur quotidien, et ils ont amenés à poser des hypothèses pour tester plus tard et aussi à expliciter quelques unes de leurs idées préalables sur un certain concept en situation.

En permettant d'identifier les questions centrales et de prévoir quelques doutes et difficultés, ce travail au préalable a été très utile en ce qui concerne la préparation du moment suivant, la réalisation de l'activité avec les élèves.

Um compte-rendu de chacun des cours a été élaboré, dans lequel on a inclu le registre d'affirmations et de prévisions considérées valables ou curieuses. Ce registre a permis, finalement, de conclure de l'efficace de la méthodologie et des stratégies utilisées.

Une analyse globale à la façon dont les activités ont été planifiées et présentées au cours de cette dissertation permet de conclure de l'intérêt de ce genre d'approche, fournit des repères sur des moyeus efficaces de résoudre quelques problèmes, tandis qu'elle met en évidence la difficulté de dépasser quelques idées préalables de certains élèves malgré la diversité de stratégies utilisées.

## *Índice*

<b>Agradecimentos</b>	...2
<b>Resumo</b>	3
<b>Abstract</b>	4
<b>Résumé</b>	5
<b>Índice</b>	.....6
<b>Índice de Figuras</b>	11
<b>Índice de Tabelas</b>	...13
<b>Índice de gráficos</b>	..13
<b>Capítulo 1- Introdução</b>	.....14
<b>Capítulo 2- Justificação para a escolha do tema</b>	.....19
<b>Capítulo 3- Objectivos da tese</b>	21
<b>Capítulo 4- Estrutura do trabalho</b>	..23
<b>Capítulo 5- Questões teóricas sobre o método de ensino questionar-investigar</b>	.....26
<b>Capítulo 6- A abordagem da temática do som de acordo com as orientações curriculares vigentes</b>	32
<b>Capítulo 7- No contexto de Ondas e Som: Movimentos ondulatórios e ondas acústicas</b>	....35
<b>7.1- Movimento ondulatório</b>	.....36
<b>7.1.1- Movimento ondulatório simples</b>	.....36
<b>7.1.2- Velocidade de propagação de uma onda</b>	.....38
<b>7.1.3- Dedução da expressão que traduz a equação da onda</b>	.....39
<b>7.2- Ondas harmónicas</b>	41
<b>7.2.1- Propagação de uma onda harmónica numa corda</b>	..     ...     41
<b>7.2.2- Ondas sonoras harmónicas</b>	.....42
<b>7.2.3- Frentes de onda: Ondas planas e ondas circulares</b>	...     ....44
<b>7.3- Comportamento de uma onda quando esta se depara com um obstáculo         ao longo da sua propagação</b>	.....45
<b>7.3.1- Reflexão, refacção e difracção</b>	.....45
<b>7.4- Sobreposição de ondas e a geração de ondas estacionárias</b>	...     .     .....47

7.4.1- Interferência de ondas harmónicas	49
7.4.2- O fenómeno dos batimentos	51
7.4.3- O conceito de coerência em movimentos ondulatórios	53
7.4.4- Ondas estacionárias	53
7.4.4.1- A propagação de ondas numa corda fixa nas duas extremidades	54
7.4.4.2- Função de onda das ondas estacionárias	56
7.4.4.3- Ondas sonoras estacionárias	57
7.4.4.4- A sobreposição de ondas estacionárias	58
7.4.4.5- Análise harmónica e síntese harmónica	58
<b>Capítulo 8- Ideias dos alunos sobre o conceito de som e fenómenos ondulatórios</b>	60
<b>Capítulo 9- Formulação, aplicação e resultados obtidos em cada uma das actividades experimentais realizadas</b>	65
9.1- Acerca das actividades experimentais aqui apresentadas e sua implementação em sala de aula	66
9.2- <u>Actividade nº 1 “A propagação do som”</u>	70
9.2.1- Introdução à actividade	71
9.2.2- Contextualização científica	71
9.2.2.1- Intensidade de uma onda sonora	73
9.2.2.2- Nível de intensidade e sonoridade	79
9.2.3- Objectivos propostos	81
9.2.3.1- Objectivos a atingir de forma directa pela realização da actividade	81
9.2.3.2- Alguns aspectos relacionados com a realização da actividade	80
9.2.4- Material necessário	82
9.2.5- Procedimento experimental	82
9.2.6- Alguns cuidados a ter na realização desta actividade	84
9.2.7- Concepções alternativas em estudo	83
9.2.8- Questões pré-laboratoriais e previsões dos alunos	85
9.2.9- Reflexão sobre algumas das possíveis hipóteses de resposta dos alunos às questões pré-laboratoriais apresentadas	86
9.2.10- Resultados obtidos experimentalmente	87

9.2.11- Questões pós-laboratoriais	91
9.2.12- Algumas conclusões importantes	92
9.2.13- Análise pós-aula...	93
9.2.13.1- Caracterização da turma e condições de realização da actividade	93
9.2.13.2- Antes da realização da actividade	94
9.2.13.3- O decorrer da actividade	98
9.2.13.4- Reflexão crítica aos resultados obtidos	102
9.2.13.5- Principais conclusões sobre o decorrer da actividade	104
9.2.13.6- Sugestões para futuras aplicações	105
<b>9.3- Actividade nº 2: “Velocidade de propagação do som no ar”</b>	108
9.3.1- Introdução à actividade	108
9.3.2- Contextualização científica	109
9.3.2.1- Intensidade sonora	115
9.3.2.2- Absorção de ondas sonoras	115
9.3.2.3- Reflexão e refacção de ondas sonoras	117
9.3.2.3.1- Impedância acústica	118
9.3.2.5- Processo de reverberação de uma onda sonora	121
9.3.3- Contexto problemático	122
9.3.4- Objectivos propostos	128
9.3.4.1- Objectivos a atingir pela realização da presente actividade	128
9.3.4.2- Alguns aspectos relacionados com a realização da actividade	128
9.3.5- Material necessário	129
9.3.6- Procedimento experimental	129
9.3.7- Alguns cuidados a ter na realização desta actividade	127
9.3.8- Concepções alternativas em estudo	131
9.3.9- Questões pré-laboratoriais	128
9.3.10- Algumas previsões sobre possíveis respostas às questões pré-laboratoriais acima apresentadas	133
9.3.11- Resultados obtidos experimentalmente	133
9.3.12- Questões pós-laboratoriais	137
9.3.13- Algumas conclusões importantes a retirar	138

9.3.14- Análise pós-aula	..136
9.3.14.1- Caracterização da amostra e condições de realização da actividade	.140
9.3.14.2- Antes de realizar a actividade	.140
9.3.14.3- O decorrer da actividade	.143
9.3.14.4- Reflexão crítica aos resultados obtidos	...145
9.3.14.5- Principais conclusões sobre o decorrer da actividade e algumas sugestões para futuras aplicações	...148
<b>9.4- Actividade nº 3: “<i>Estudo do Efeito Doppler em situações do quotidiano</i>”.</b>	.....149
9.4.1- Introdução à actividade	... .150
9.4.2- Contextualização científica ao tema	.....151
9.4.3- Contexto problemático em estudo	.....155
9.4.4- Objectivos propostos	.....157
9.4.3.1- Objectivos a atingir directamente pela realização da actividade	.....157
9.4.3.2- Alguns aspectos relacionados com a realização da actividade	... .157
9.4.5- Material necessário	..... .158
9.4.6- Procedimento experimental	..... .159
9.4.7- Alguns cuidados a ter na realização desta actividade	.. .160
9.4.8- Concepções alternativas em estudo	. .160
9.4.9- Questões pré-laboratoriais	. .161
9.4.10- Reflexão sobre algumas das possíveis respostas dos alunos às questões pré-laboratoriais apresentadas	. .162
9.4.11- Resultados obtidos experimentalmente	.163
9.4.12- Questões pós-laboratoriais	.168
9.4.13- Algumas conclusões importantes	.169
9.4.14- Análise pós-aula	.170
9.4.14.1- Caracterização da amostra e condições de realização da actividade	.170
9.4.14.2- Antes de proceder à realização da actividade	. .171
9.4.14.3- O decorrer da actividade	.... 175
9.4.14.4- Reflexão crítica aos resultados obtidos	.. ... 178

9.4.14.5- Principais conclusões sobre o decorrer da actividade	.. .....	181
9.4.14.6- Algumas sugestões para futuras aplicações	..	183
Capítulo 10- Conclusões gerais do trabalho realizado	..	185
Apêndices		189
Lista de referências		195

## *Índice de Figuras*

<b>Figura -1-</b> Alguns exemplos da enorme diversidade de fontes sonoras	..	..16
<b>Figura 7.2-</b> As ondas como perturbações de um meio material	..	..36
<b>Figura 7.3-</b> Exemplo de uma onda longitudinal gerada por um diapásão que se propaga através do ar.	..	..37
<b>Figura 7.4 -</b> Pulso unidimensional propagando-se para a direita com velocidade $v$	..	..38
<b>Figura 7.5 -</b> Aplicação das Leis de Newton na dedução da equação de onda de uma onda que se propaga ao longo do segmento de uma corda.	...	...39
<b>Figura 7.6 -</b> Representação gráfica da variação da amplitude de deslocamento e da amplitude de pressão em função da posição.	...	42
<b>Figura 7.7 -</b> Ondas geradas numa tina de ondas por uma fonte puntiforme	..	44
<b>Figura 7.8 -</b> Reflexão de uma onda	...	45
<b>Figura 7.9 -</b> Pulsos ondulatórios que se deslocam ao longo de uma onda em direcções contrárias.	.....	48
<b>Figura 7.10 -</b> Sobreposição de duas ondas harmónicas idênticas $y_1$ e $y_2$	..	49
<b>Figura 7.11 -</b> O fenómeno dos batimentos originados pela combinação de duas ondas com frequências ligeiramente diferentes.	...	..51
<b>Figura 7.12-</b> Representação dos modos de vibração de uma corda de comprimento $L$ fixa nas duas extremidades, assim como das suas respectivas frequências de ressonância.		54
<b>Figura 9.13-</b> Representação da flutuação da pressão $p(x,t)$ e do deslocamento $y(x,t)$ associada à propagação de uma onda sinusoidal progressiva, para um dado instante $t$ .		74
<b>Figura 9.14 –</b> Propagação de uma onda numa corda, assinalando-se as componentes da força exercida sobre um segmento da corda.	..	75
<b>Figura 9.15-</b> Propagação de uma onda transversal e longitudinal numa mola	..	86
<b>Figura 9.16 -</b> Registo sonoro da onda gerada no Cool Edit e reproduzida pelo altifalante ao longo do procedimento.		89
<b>Figura 9.17 -</b> Análise em frequência da onda sonora gerada com o Cool Edit e reproduzida pelo altifalante.	..	87
<b>Figura 9.18 -</b> Registo sonoro obtido ao longo da primeira fase da actividade	..	88



à medida que o ar foi sendo retirado da campânula.	
<b>Figura 9.19</b> - Análise em frequência do som registado com o microfone	.90
à medida que o ar vai sendo retirado da campânula.	
<b>Figura 9.20</b> - Representação esquemática de duas ondas sinusoidais caracterizadas pelo mesmo valor de frequências mas com diferentes amplitudes.	97
<b>Figura 9.21</b> - a) Representação do modo de propagação de uma onda sonora, comprimindo e rarefazendo o meio alternadamente.	109
b) Representação de uma onda sonora com uma onda de pressão.	
<b>Figura 9.22</b> - Representação de uma porção de gás no qual se propaga uma onda elástica.	110
<b>Figura 9.23</b> - Representação gráfica da variação do coeficiente de atenuação em função da humidade relativa do meio de propagação.	117
<b>Figura 9.24</b> - Representação esquemática do tempo de reverbação de uma onda	122
<b>Figura 9.25</b> - Propagação de uma onda sísmica na crosta terrestre	123
<b>Figura 9.26</b> - Modo de vibração do meio material à passagem dos diferentes tipos de ondas sísmicas.	124
<b>Figura 9.27</b> - Exemplo de um sismograma	125
<b>Figura 9.28</b> - Representação gráfica do tempo em que são registados cada um dos tipos de ondas sísmicas em função da distância epicentral.	126
<b>Figura 9.29</b> - Comparação dos tempos de chegada das diferentes ondas sísmicas a três estações sismológicas situadas a diferentes distâncias do foco do sismo.	126
<b>Figura 9.30</b> - Registo sonoro do som gerado por um bater de duas estacas metálicas que percorre uma mangueira de 15,5 m.	136
<b>Figura 9.31</b> – Registo sonoro do som gerado por um bater de palmas que percorre uma mangueira de 15,5m.	136
<b>Figura 9.32</b> – Movimento de um comboio relativamente a um indivíduo em repouso numa estação.	151
<b>Figura 9.33</b> – O Efeito Doppler observado numa tina de ondas	153
<b>Figura 9.34</b> – Movimento de uma fonte A que se movimenta com uma velocidade constante $v_F$ relativamente a um observador estacionário O.	153
<b>Figura 9.35</b> – Representação do Efeito Doppler na situação em que a	154

fonte e o observador se movem um relativamente ao outro.

**Figura 9.36** – Onda de choque provocada por um avião a jacto em movimento 155

**Figura 9.37** – Exemplo de um aparelho de radar utilizado pela brigada de trânsito na segurança rodoviária. 156

## *Índice de Tabelas*

**Tabela 9.1-** Intensidade e nível de intensidade de alguns ruídos comuns 79

**Tabela 9.2-** Velocidade de propagação do som em diferentes meios materiais ..113

**Tabela 9.3-** Resultados obtidos experimentalmente para a velocidade de propagação de um sinal sonoro numa mangueira com diferentes dimensões. ...135

**Tabela 9.4** Cálculo de um valor médio para a velocidade com que o automóvel se desloca ao longo da calha ( $v_0$ ) para cada um dos ensaios realizados. 163

**Tabela 9.5, 9.6 e 9.7-** Resultados obtidos para o cálculo da velocidade do automóvel na calha com base no Efeito Doppler ( $v_R$ ) para os diferentes ensaios realizados. ..164

**Tabela 9.8-** Análise comparativa dos resultados obtidos experimentalmente para os diferentes ensaios realizados. 166

## *Índice dos gráficos*

**Gráfico 9.1-** Representação gráfica da variação da amplitude de pressão medida em função da pressão manométrica presente no interior da campânula. 91

**Gráfico 9.2-** Representação gráfica dos valores obtidos para  $\frac{\bar{f}_{aprox} - \bar{f}_{afast}}{2}$  em função da velocidade do automóvel. 162

# Capítulo 1

# *Introdução*

O estudo das ondas mecânicas tem-se tornado cada vez mais relevante nos dias que decorrem, dadas as suas inúmeras aplicações nas mais diversas áreas da Ciência e Arte.

Relembre-se o quão agradável é quando nós, espectadores, nos deparamos com um fantástico espectáculo de uma orquestra sinfónica, com a elevada diversidade de sons que advêm da grande variedade de instrumentos, com sons e timbres tão característicos. Esta forma de arte que é a música, requer que se efectue um estudo cuidado sobre o som, as suas propriedades, formas de propagação e produção.

Mas as aplicações do som e das ondas mecânicas vão muito mais além. Refira-se a importância do som na área da Medicina, por exemplo nas ecografias, no tratamento e diagnóstico de doenças, entre outras aplicações baseadas na ultra-sonografia. Os ultra-sons possuem também inúmeras aplicações na Geologia, na Metalurgia e na Oceanografia, com a utilização do sonar na determinação da profundidade dos oceanos, na busca de barcos desaparecidos ou afundados, na localização de cardumes, no sistema de navegação utilizado nos submarinos. Os ultra-sons são também usados como forma de comunicação e orientação de alguns animais, como é o caso dos golfinhos.

Também a Arquitectura e a Engenharia Civil se têm apoiado na realização de testes acústicos e nos seus resultados para a construção e desenho de edifícios, salas de espectáculos, construção de casas e no isolamento acústico.

Dando início ao desenvolvimento do tema, é importante definir as ondas como perturbações de diferentes tipos, que envolvem trocas de energia ao longo da sua propagação no meio material, podendo ser caracterizadas pela forma como esta energia se manifesta. Ao introduzir os movimentos ondulatórios, podemos referir um conjunto de cordas vibrantes (que perturbam o meio ambiente, provocando uma variação de pressão e densidade do meio, com uma consequente geração de ondas sonoras), o modo de funcionamento dos radares (que irradiam ondas electromagnéticas, que após serem reflectidas por um objecto reflector, são de novo captadas), ou o sonar (que permite emitir ultra-sons e captar ecos sonoros dentro de água). Também a visão humana, tal como na maior parte dos animais, resulta da captação de ondas electromagnéticas e uma consequente conversão destas em sinais eléctricos. Por outro lado, uma estação de rádio modela a amplitude ou frequência da onda electromagnética transmitida de modo a tornar possível as comunicações a grandes distâncias. Como último exemplo, os raios laser, enquanto ondas electromagnéticas de alta energia, são utilizados para soldas.

Muito do conhecimento que os humanos possuem sobre o mundo físico envolve a utilização dos sentidos. Por exemplo, quando vemos ou ouvimos o que se passa à nossa volta, estamos indiscutivelmente a interagir com fenómenos ondulatórios.

A acústica, enquanto ciência do som, estuda tanto a sua geração, como a sua transmissão, assim como os seus efeitos. Para que se origine som é estritamente necessário que um objecto oscile com uma determinada frequência e que esta oscilação se propague até ao aparelho receptor, que poderá ser, por exemplo, o ouvido humano.

No dia a dia, quando falamos em som, rapidamente associamos este a um movimento ondulatório que se propaga no ar, o qual é responsável pela sensação de audição. No entanto, na presente dissertação ir-se-á abordar a temática do som numa perspectiva mais abrangente, abordando também perturbações com frequências demasiado altas ou baixas para que possam ser perceptíveis pelo Homem, sendo estas denominadas respectivamente por ultra e infra-sons. Estudar-se-ão, de um modo geral, ondas mecânicas que se propagam em outros meios gasosos que não o ar, mas também em sólidos e fluidos. Todos estes casos têm em comum a necessidade de existência de um meio material que sustente a propagação da onda gerada. Estas características permitem distinguir as ondas mecânicas das electromagnéticas, na medida em que estas últimas não necessitam de um meio que sustente a sua propagação.

Os sons podem ter uma origem natural ou ser provocados pelo Homem. Podemos dar como exemplos o simples ladrar de um cão, o chilrear dos pássaros ou o ruído de uma máquina em funcionamento. Por sua vez, a sensação que os diferentes sons provocam no ser humano surge como o resultado de diferentes factores e influências. Todos estes aspectos constituem o objecto de estudo de diferentes áreas da acústica e de outras com ela relacionadas, tais como a gravação e reprodução de som, acústica de edifícios, o controlo de ruído acústico e a própria fala.



**Figura 1-** Alguns exemplos da enorme diversidade de fontes sonoras.

Outra importante área da acústica com grande número de aplicações tecnológicas consiste no estudo dos efeitos físicos do som em substâncias com as quais este interage. Pelo facto da transmissão do som ser afectada pelo meio através do qual este se propaga é possível, por análise do som propagado, retirar informação sobre o meio de propagação.

Devido às inúmeras aplicações do som e da acústica, algumas das quais foram aqui anteriormente apresentadas, a temática do som, a sua propagação, produção e recepção, assim como o estudo das ondas sonoras constituem conteúdos que têm sido incorporados nos currículos escolares, tanto no ensino básico (8ºano) como no ensino secundário, no 11ºano.

Neste âmbito, considera-se importante antes de mais estudar e explorar os conceitos físicos implícitos nesta temática, confrontando os alunos com muitas das ideias que estes possuem sobre a mesma. Para tal, é necessário que enquanto professores estejamos plenamente conscientes que esta temática não é de todo de fácil compreensão, tornando-se por isso necessária uma reflexão sobre o tipo de estratégias que poderão e deverão ser por nós utilizadas na exploração destes conceitos e conteúdos.

É neste âmbito que se insere o presente trabalho, apresentando-se como um objectivo prioritário para a elaboração da presente dissertação a construção de um conjunto de recursos e materiais didácticos incluindo um leque de actividades que possam surgir como uma possível alternativa nas aulas de Ciência aquando da leccionação da temática das ondas mecânicas e do som.

No estudo dos fenómenos e conceitos fulcrais associados à temática do som e das ondas mecânicas ir-se-á sempre ter o cuidado de apresentar uma exploração dos mesmos inserida em contextos problemáticos adequados, não nos limitando simplesmente à elaboração e descrição de um conjunto de actividades experimentais e à apresentação dos resultados obtidos através da execução das mesmas. Pretende-se, pelo contrário, integrar este conjunto de conceitos físicos numa perspectiva multidisciplinar, valorizando a aquisição pelos alunos de determinado leque de conhecimentos e competências, que provenham da análise de resultados obtidos por via experimental, os quais se encontrarão por sua vez integrados num determinado modelo teórico. Valorizar-se-á a aquisição de determinado leque de competências como o saber observar, interpretar, o questionamento, o espírito crítico, entre outras competências essencialmente ligadas ao saber fazer, tentando estimular o espírito de questionamento destes alunos.

Em termos do processo ensino-aprendizagem nunca será de mais aqui salientar as vantagens inerentes à prática do trabalho experimental assim perspectivado, as quais vão desde a

identificação do problema, passando pela planificação do conjunto de procedimentos a serem seguidos, até à análise e interpretação dos resultados obtidos experimentalmente de acordo com um quadro teórico adequado, que permita aos alunos construir inferências sobre relações implícitas, assim como aplicar estes novos conhecimentos a novas situações problema que possam surgir no futuro.

## Capítulo 2

# *Justificação para a escolha do tema*



Antes de mais considera-se importante aqui justificar, embora de forma bastante sucinta, a escolha do tema desta dissertação de entre a enorme variedade de temas existentes. Começou-se por optar pela realização de um trabalho que permitisse de algum modo contribuir para uma alteração da forma de ensinar Física, onde se pressupõe a reformulação do papel do professor e do aluno, bem como do conjunto de metodologias e estratégias a utilizar. De entre a enorme diversidade de áreas em Física que poderiam aqui ser abordadas optou-se pelo estudo do som e dos movimentos ondulatórios. Tal escolha justifica-se, por um lado, pelo facto desta temática se encontrar incorporada no novo programa de Física e Química A do 11º ano, vigente há três anos no ensino português. Por outro lado, se é verdade que este mesmo tema suscita uma elevada curiosidade nos alunos, constata-se também que a ele se encontra associado um elevado conjunto de ideias prévias erradas ou incompletas. Acontece que o facto de muitos dos conceitos associados a este tema requererem por parte do aluno uma elevada capacidade de abstracção ou serem algo complexos, leva muitas vezes os professores a questionarem-se sobre a forma mais eficaz de os explorar em contexto de sala de aula, de modo a permitir uma melhor compreensão por parte dos seus alunos. A escolha do tema foi ainda motivada pelo elevado número de aplicações desta área da Física no dia a dia, nos mais diversos campos.

## Capítulo 3

# *Objectivos da tese*

Pela realização da presente dissertação, nomeadamente através da elaboração do conjunto de actividades aqui apresentadas, pretendeu-se atingir um conjunto de objectivos, de onde se destacam os seguintes:

- Contribuir para o encontrar de soluções que permitam contornar muitas das dificuldades dos alunos (no que se refere ao grau de abstracção e bases matemáticas necessárias à compreensão de alguns temas), levando-os a questionar e colocar à prova as concepções alternativas e as ideias prévias que possuem sobre os conceitos em causa, as quais na sua maioria derivam das suas vivências do dia a dia;
- Sistematizar os conhecimentos científicos subjacentes ao estudo do movimento ondulatório e mais especificamente às ondas sonoras, existindo, no entanto, o cuidado de não tornar esta abordagem tão dependente da Matemática, tentando adequar os conteúdos científicos aqui explorados à estrutura de conhecimentos do aluno do ensino secundário, apesar de frequentemente se proceder a um maior aprofundamento de alguns princípios ou conceitos físicos relacionados com esta temática, sempre que tal se considere relevante;
- Servir como material didáctico de apoio aos professores de Física na exploração da temática dos movimentos ondulatórios e do som. Neste âmbito, existiu uma preocupação de construir um conjunto de protocolos adequados à execução laboratorial das diferentes actividades experimentais aqui propostas, numa perspectiva didáctico-pedagógica que se encontre de acordo com a metodologia de ensino-aprendizagem utilizada;
- Apresentar algumas aplicações tecnológicas do som e da Acústica, como por exemplo, a utilização do Efeito Doppler pelos radares policiais.

## Capítulo 4

# *Estrutura do trabalho*

Antes de mais considera-se essencial apresentar, embora de um modo bastante geral, a estrutura do presente trabalho. Esta dissertação encontra-se dividida em dez capítulos, dos quais se destaca a forma como alguns destes se encontram organizados:

No capítulo número cinco é realizada uma caracterização do tipo de ensino no qual se baseou o conjunto de actividades e estratégias aqui pensadas, elaboradas e aplicadas, referindo os seus pontos de intervenção prioritários, os objectivos principais que nos propomos atingir através da utilização deste tipo de metodologia e as competências que a utilização deste tipo de estratégias permite desenvolver nos alunos, assim como algumas das dificuldades que poderão surgir na implementação das mesmas e ainda qual deverá ser o novo papel do professor neste modelo de ensino.

No capítulo número seis apresenta-se de um modo sucinto o conjunto de orientações curriculares elaboradas pelo Ministério de Educação para a disciplina de Física e Química A-11ºano e ainda para o oitavo ano de escolaridade na disciplina de Ciências Físico-Químicas. Ao pensar as actividades aqui apresentadas deverá ter-se em atenção que conceitos e conteúdos se pretende que os alunos adquiram no final dos anos em causa de acordo com estas orientações.

No capítulo sete é realizada uma revisão dos principais fundamentos físicos relacionados com a temática do som, e mais especificamente com as ondas acústicas, enquanto ondas mecânicas. Ir-se-á começar por caracterizar o movimento ondulatório simples, abordando-se neste capítulo alguns temas principais, tais como a propagação de uma onda numa corda, a dedução da expressão da velocidade de propagação deste tipo de ondas, assim como o estudo das ondas harmónicas. Ao estudar em específico as ondas sonoras, são abordados conceitos importantes, tais como o modo de propagação de uma onda sonora no ar, assim como algumas das principais propriedades físicas do som que podem ser mensuráveis experimentalmente, introduzindo-se conceitos fundamentais como o de intensidade sonora, amplitude de pressão e amplitude de deslocamento. De um modo geral, pretende-se neste capítulo apresentar uma base teórica e científica sobre os temas em estudo no conjunto de actividades que serão posteriormente apresentadas.

No capítulo oito faz-se um levantamento e reflexão sobre as principais concepções alternativas associadas ao estudo do som e dos movimentos ondulatórios. Algumas destas concepções serão posteriormente trabalhadas ao longo de cada uma das actividades aqui apresentadas, na medida em que se relacionam com os conteúdos e conceitos em estudo nestas.

No capítulo nove são apresentadas cada uma das actividades elaboradas, desde o contexto teórico em que cada uma se insere, aos objectivos que se pretende atingir pela sua implementação, o procedimento experimental levado a cabo, assim como os resultados obtidos experimentalmente e a análise realizada após a aplicação de cada uma destas em contexto de sala de aula.

É importante salientar que alguns dos conceitos físicos apresentados no capítulo anterior surgem novamente ao longo das actividades na contextualização científica das mesmas, embora na maioria dos casos estes sejam explorados com uma maior profundidade em cada uma das actividades. A justificação para tal deve-se ao facto de se pretender, nesta dissertação, elaborar um conjunto de recursos didácticos que possam ser utilizados de modo independente, sem se exigir um conhecimento ou realização das restantes actividades.

Finalmente, no capítulo dez apresentam-se algumas conclusões importantes sobre todo o trabalho aqui realizado, reflectindo sobre o sucesso, ou não, na implementação do conjunto de actividades aqui pensadas e elaboradas, fazendo-se também referência a alguns aspectos que poderão ser melhorados num trabalho futuro, ou ainda sugestões de possíveis projectos a serem realizados no futuro de modo a dar continuidade ao trabalho aqui iniciado.

## Capítulo 5

*Questões teóricas sobre o método  
de ensino questionar/investigar*

Na presente dissertação ir-se-á proceder à aplicação em contexto de sala de aula de um conjunto de actividades e estratégias cujas características, nomeadamente a sua estrutura, se encontram integradas num modelo de ensino organizado em torno do questionamento e investigação. Convém, antes de mais, salientar que os princípios orientadores do modo como são levadas a cabo as intervenções na sala de aula ao longo da presente dissertação encontram-se de acordo com um tipo de ensino denominado de “*Inquiry*” levado a cabo nos Estados Unidos, o qual é relatado em vários artigos (referidos ao longo do texto) publicados na revista “*Science Teacher*” do NSTA (National Science Teachers Association).

Deste modo, e antes de fazer qualquer referência ao conjunto de estratégias de ensino e actividades levadas a cabo ao longo deste trabalho, considera-se necessário realizar uma síntese das principais características deste modelo de ensino, apresentando de um modo sumário algumas das suas inúmeras vantagens e contributos para a Educação em Ciência (Dias, 1998).

Antes de mais é curioso salientar que ao longo do presente trabalho, ao se tentar traduzir a palavra *Inquiry* deparamo-nos com uma dificuldade acrescida na procura de um significado que pudesse descrever do modo mais completo possível todo o conjunto de ideologias e metodologias que se encontram subjacentes a este conceito. Deste modo, e na procura deste significado, concluiu-se que o *Inquiry* poderá ser apresentado como uma metodologia multifacetada que implica a realização da observação, a formulação de questões, a consulta de livros e de outras fontes de informação, assim como o planeamento de uma investigação, a utilização de ferramentas na implementação destes planos de acção, até à análise, interpretação e comunicação dos resultados obtidos. Esta metodologia passa, também, pelo propor de respostas para as questões levantadas (Ohana, 2006).

Para tal, é importante começar por referir que o processo ensino-aprendizagem em Física implica aprender e observar fenómenos, formular hipóteses, conceber e realizar experiências, assim como interpretar os resultados obtidos nestas. Ou seja, esta aprendizagem consiste acima de tudo em saber observar, questionar e realizar experimentalmente, sendo mais do que “Saber pelo saber”, ou seja, implica o “Saber fazer”. Para se poder atingir este conjunto de objectivos é fundamental que haja um envolvimento e participação activa do estudante na realização das tarefas propostas, indo mais além do que a simples realização de protocolos experimentais, que exigem um trabalho detalhado e metucioso, mas que é impessoal para o aluno (Dias, 1998).

Antes de mais é necessário estarmos conscientes da necessidade de se alterar a educação em Ciência, passando de um modelo tradicional, essencialmente demonstrativo, para um ensino



em que os alunos sejam confrontados e estimulados à resolução de questões problema numa perspectiva mais aberta. A aplicação de actividades que permitam estimular o questionamento apresenta inúmeras vantagens, de entre as quais se salienta o facto de permitir que os alunos descubram por eles próprios algumas das relações existentes em Ciência, assemelhando-se em muitos dos seus métodos e processos de pensamento à forma como um cientista trabalha com o objectivo de expandir o conhecimento humano sobre o mundo natural (Gerking, 2004).

Uma das principais características deste tipo de ensino que é preciso salientar é o facto de permitir que os alunos tenham um papel activo na construção do seu próprio conhecimento à medida que vão respondendo às questões com as quais se vão confrontando. Para nós, professores, é importante termos noção da dificuldade implícita na implementação destes projectos na sala de aula. Pretende-se, pois, neste modelo de ensino promover um conjunto de actividades que permitam ao aluno interpretar as evidências que lhe vão surgindo.

Desta forma, é importante compreendermos que o ensino em Ciência deverá estar associado à investigação científica, devendo-se seleccionar estratégias de aprendizagem que reflectam o método de investigação científica, e mais especificamente, as competências de observação, experimentação e reflexão. Ao tentar conceber uma educação em Ciência deste tipo é importante pensarmos sobre a sua estrutura e sobre dois conceitos fulcrais, que são respectivamente, o conteúdo (*O que ensinar?*) e o processo (*Como ensinar?*) (Adams & Chiappetta, 2004).

Vários são os motivos que poderão ser apontados de modo a defender este tipo de educação: por um lado, o facto desta promover uma melhor compreensão dos factos, princípios, leis e teorias em estudo e por outro lado o facto de permitir o desenvolvimento de ferramentas que favorecem a aquisição de conhecimentos e a disposição para encontrar respostas às questões colocadas, questionando a veracidade das mesmas e a aplicabilidade destas a situações do quotidiano.

Com base nas vantagens anteriormente apresentadas para um trabalho experimental e uma metodologia baseada no *Inquiry*, conclui-se que este tipo de ensino desempenha um papel fulcral ao proporcionar situações de debate e confronto de ideias, mas, também, ao nível da concepção e da execução do plano experimental, assim como da avaliação de todo o processo levado a cabo.

Ao estudar a aplicação deste tipo de ensino, não se pode deixar de falar das dificuldades sentidas pelos alunos na sua realização, cabendo ao professor o papel de intervir de forma a melhorar o desempenho dos seus alunos na realização das mesmas. Deste modo, é importante

referir que ao realizar este tipo de actividades muitos alunos não conseguem proceder a uma correcta análise do problema em estudo, não colocando em acção as suas ferramentas de planeamento necessárias à condução da investigação em causa (Hackling e Garnett, 1995) (Chin, 2003) Por outro lado, são muitos os alunos que trabalham numa actividade sem saberem o propósito da mesma (Watson, 1994 *in* Chin, 2003).

Por último, verifica-se que muitos alunos manifestam dificuldades em efectuar as medições necessárias, o que se deve muitas vezes a uma má utilização do equipamento disponível, não conseguindo identificar e manter constantes as variáveis de controlo ou utilizando um número de medições limitado ou realizadas num curto intervalo de tempo (Chin, 2003).

De modo a tornar a aplicação deste tipo de ensino mais vantajoso e eficaz, é importante que os alunos compreendam que as conclusões a retirar da actividade deverão constituir uma resposta directa à questão-problema em causa, devendo ser consistentes com a informação previamente recolhida, relacionando-se com os seus propósitos. Por seu turno, na interpretação dos resultados obtidos deverão identificar-se as relações existentes entre as diferentes variáveis, realizando-se generalizações e relações entre a informação recolhida (Chin, 2003).

Numa fase de pós-investigação os alunos deverão ser estimulados a realizar uma reflexão crítica e uma avaliação pessoal acerca do trabalho desenvolvido, de modo a obrigá-los a reflectir sobre possíveis fontes de erro das medições efectuadas, assim como a pensar sobre possíveis alterações ao procedimento efectuado.

Quanto à avaliação do trabalho realizado, esta deverá ser efectuada após o trabalho se dar como finalizado, enfatizando-se a forma como os alunos seguiram os passos implícitos na resolução de um problema, levando a cabo um procedimento adequado e reflectido, apresentando de forma clara a informação recolhida, assim como as evidências que lhes foram surgindo ao longo de todo o processo desenvolvido (Ambruso, 2003).

O ensino da Ciência ao ser perspectivado deste modo, não deve restringir-se aos processos de experimentação e observação, devendo passar pela verbalização e discussão de ideias, a reflexão e uma avaliação crítica do trabalho desenvolvido. Uma das vantagens deste tipo de trabalho consiste em permitir, em pequenos grupos, discutir sobre como e o que fazer, desde a selecção dos materiais à planificação das estratégias experimentais a serem levadas a cabo.

Numa fase posterior deverá se proceder a uma discussão pós-laboratorial, a qual tem como principal objectivo proporcionar aos alunos o confronto dos resultados obtidos com os inicialmente esperados, encorajando-os a repensar as suas ideias e processos levados a cabo na

obtenção dos mesmos. Pretende-se, deste modo, criar um conjunto de situações em que os alunos possam testar e explorar o alcance e as limitações dos modelos e teorias em causa, testando as suas concepções alternativas, assim como investigar as aplicações práticas de determinado conteúdo.

Estas actividades deverão apresentar características como a reflexão e a criatividade, num clima propício, devendo a sala de aula ser vista como um lugar de debate de opiniões devidamente fundamentadas, onde os alunos são incentivados a apresentar e a colocar à prova as suas opiniões. Mais do que realizar e observar, o que está em causa é o *como* e o *porquê*, tendo em conta a estratégia didáctica utilizada pelo professor.

Um ponto importante a debater é a ineficácia educativa que muitas vezes se verifica quando o trabalho experimental é aplicado na sala de aula, podendo esta ser explicada por diferentes motivos. Por um lado, poder-se-á apontar a postura passiva muitas vezes manifestada pelos alunos, desvalorizando-se actividades de debate e exploração das ideias em jogo, não tendo em conta os interesses, saberes e ideias prévias dos alunos. Por este motivo se defende a necessidade de uma mudança urgente das concepções e práticas experimentais, diversificando as estratégias a serem utilizadas, de modo a que estas se adequem aos diferentes objectivos que se pretende atingir, assim como ao nível etário dos alunos, promovendo-se ambientes de aprendizagem propícios ao envolvimento efectivo por parte destes alunos (Dias, 1998).

Outro dos motivos que poderá estar na origem de muita da ineficácia do trabalho experimental será o facto de muitas vezes a curiosidade inicial que os alunos manifestam pelos fenómenos em Ciência não ser minimamente satisfeita, sentindo-se estes frequentemente desiludidos pela execução de uma abordagem teórica de conteúdos fastidiosos e inacessíveis, sem existir por parte do professor uma preocupação em realizar uma contextualização do trabalho a realizar, tentando mostrar o seu interesse prático. Desta forma, não será de admirar que muitas vezes surja por parte dos alunos um sentimento de desinteresse e desilusão perante a realização de uma tarefa deste tipo.

Verifica-se que, muitas vezes, os alunos se deparam com um processo caracterizado pelo seu carácter repetitivo, na qual o contexto, o material e as manipulações a efectuar são escolhidas e organizadas pelo professor com o objectivo específico de evidenciar determinado conceito, executando um protocolo experimental detalhado, de modo à obtenção do resultado correcto e de acordo com o inicialmente esperado.

De um modo geral pretendeu-se aqui apresentar alguns aspectos importantes que deverão ser tidos em atenção numa educação baseada no questionamento, que nos permita ajudar, enquanto professores, a reconceptualizar e a utilizar esta metodologia na sala de aula em Ciência, mais propriamente na implementação do trabalho experimental. Verifica-se que ao aplicar este tipo de ensino os alunos têm a oportunidade de aprender como formular e testar hipóteses a partir da realidade e pela observação crítica da mesma. Por outro lado, nota-se que quando os alunos compreendem os conceitos por si próprios, são capazes de os integrar na sua estrutura de conhecimentos. Estes, ao expressarem as suas pré-concepções, estão mais aptos a obter a ajuda de que necessitam para rejeitar as mesmas e formular conceitos cientificamente correctos.

Em forma de conclusão podemos referir que a construção de um ambiente e de um contexto baseado no *Inquiry* pressupõe que o professor altere a sua concepção de ensino, abandonando as estratégias orientadas para um tipo de ensino mais convencional (Rutherford *et al.*, 2003). É importante termos consciência que a concepção (errada) de que a Ciência é um conhecimento provado pode muitas vezes levar os alunos a rejeitar ideias cientificamente aceitáveis, só porque estas não se integram no conjunto de resultados inicialmente esperados (Bell & Michaels, 2003).

Ao longo da presente dissertação tentar-se-á ter em atenção todos os aspectos aqui apresentados relativamente ao papel do trabalho experimental e a forma como este deverá ser encarado. Deste modo, seleccionaram-se algumas actividades a serem aqui trabalhadas, exploradas e aplicadas em contexto de sala de aula, relativamente à temática dos movimentos ondulatórios, e mais especificamente no estudo das ondas sonoras. Na elaboração deste conjunto de actividades tentou-se, antes de mais, ter em consideração as ideias prévias dos alunos sobre os conceitos a abordar em cada uma das actividades, promovendo um ambiente de sala de aula propício ao questionamento, de acordo com as características anteriormente apresentadas.

Faculdade de Ciências do Porto
Biblioteca do Departamento de Física

## Capítulo 6

*A abordagem da temática do Som  
de acordo com as orientações  
curriculares vigentes*

Nesta fase do trabalho é importante explorar a forma como a temática do Som, enquanto movimento ondulatório, é abordada de acordo com as orientações curriculares em vigor para a disciplina de Física e Química A (11º ano) e a disciplina de Ciências Físico-Químicas (8º ano).

No que se refere à abordagem deste tema no 11º ano, esta surge integrada na segunda unidade da componente de Física, a qual se denomina de “*Comunicações a longas e curtas distâncias*”, na qual se estuda a forma como se processa a transmissão de informação nas mais diversas formas. Para tal, estudam-se os conceitos de radiação electromagnética enquanto onda que se propaga no espaço. Mais especificamente, ao falar em comunicação de informação a curtas distâncias estuda-se a transmissão de sinais e a sua forma de propagação, assim como a energia associada a este processo e a velocidade com que este tem lugar. Neste âmbito, exploram-se os conceitos de onda, acentuando a sua periodicidade no tempo e no espaço, focando a atenção no estudo das ondas harmónicas e sua equação característica.

No que se refere ao estudo das ondas sonoras, estuda-se a produção e propagação de um sinal sonoro harmónico, assim como as características dos sons harmónicos complexos e ainda os processos de reflexão, refração e interferência.

Relativamente ao estudo deste tema no 8º ano é, antes de mais, importante referir que esta é a primeira vez que os alunos são confrontados com o estudo destes conceitos, nomeadamente com o conceito de onda. Deste modo, é importante que estes se apercebam da grande diversidade de fontes sonoras e a forma como ocorre a produção de som, processo este que se encontra associado à vibração da fonte geradora do mesmo. Para tal, deverá se recorrer a exemplos do dia a dia, tais como o som gerado pela corda de uma guitarra, o som produzido por uma régua quando esta é colocada a vibrar, entre outros.

Antes de mais é importante introduzir aos alunos alguns conceitos importantes relacionados com o movimento ondulatório, tais como o de amplitude e frequência, assim como o de altura, intensidade sonora e timbre. Depois de explorar algumas das principais características das ondas sonoras sugere-se que seja explorada a forma como o som se propaga, assim como a velocidade com que esta propagação tem lugar. Tal abordagem deverá ser realizada tendo em conta a estrutura de conhecimentos dos alunos, o que implica que não se explore a equação que traduz a dependência desta grandeza com a temperatura.

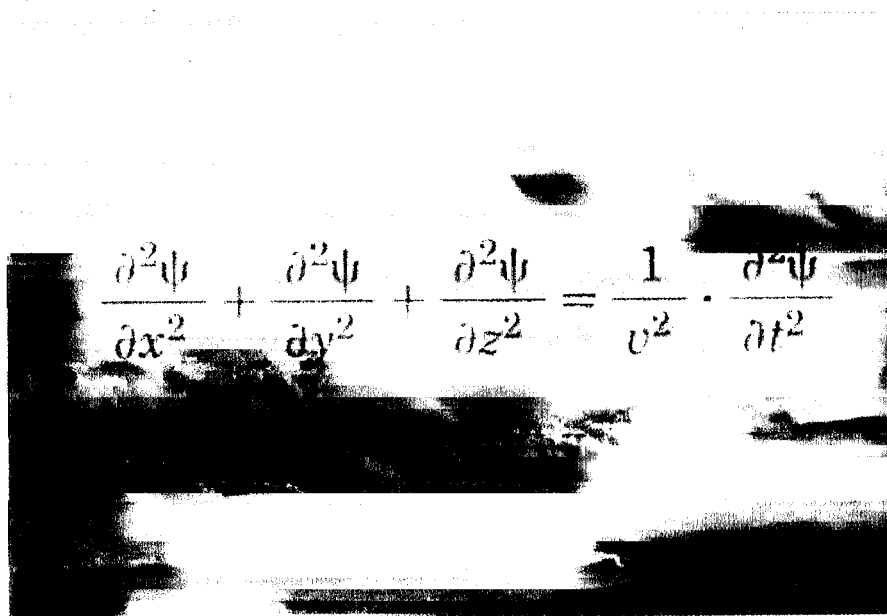
No que respeita ao modo de propagação do som é importante que os alunos compreendam que a vibração da fonte sonora se propaga através das partículas que constituem o meio, encontrando-se este processo associado a uma transferência de energia cinética.

Por último, foca-se a atenção no processo de audição destes mesmos sons, na medida em que para que um som seja ouvido é necessário que este se propague até aos nossos ouvidos e que seja captado por estes, transmitindo a impressão sonora ao cérebro, o que implica o estudo do modo de funcionamento do ouvido humano.

## Capítulo 7

*No contexto de Ondas e Som:*

*Movimentos ondulatórios e  
ondas acústicas*


$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}$$





**Figura 7.2-** As ondas como perturbações de um meio material.

As oscilações, e mais especificamente as oscilações harmónicas, são extremamente importantes do ponto de vista físico, mas também do ponto de vista matemático, na medida em que estas constituem a base para a construção de formas de oscilação mais complexas. Este tipo de oscilação, no qual as partículas que constituem o meio se influenciam mutuamente, transmitindo as suas oscilações às partículas vizinhas com uma determinada diferença de fase, permite explicar por que motivo os fenómenos ondulatórios se encontram presentes em muitos dos fenómenos físicos que têm lugar no mundo circundante, desde as ondas do mar às ondas sonoras, aos ultra-sons, às ondas sísmicas, etc (Kinsler, 1976).

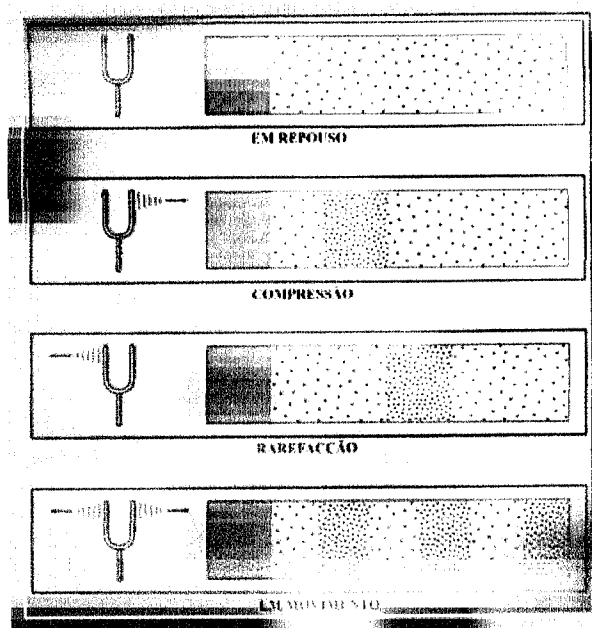
## **7.1- *Movimento ondulatório***

### **7.1.1- Movimento ondulatório simples**

As ondas transportam energia e momento através do espaço, sem necessariamente terem de transportar matéria. No caso de uma onda mecânica, este efeito é conseguido provocando uma perturbação, a qual se propaga através do meio. No caso de uma corda que recebe um impulso transversal, a deformação avança ao longo da corda como um pulso ondulatório, sendo a deformação a modificação da forma da corda em relação à sua posição de equilíbrio, devendo-se a propagação do impulso à interacção de cada segmento da corda com o segmento adjacente. Pode-se, ainda, acrescentar que durante a propagação do pulso cada segmento da corda se desloca numa direcção perpendicular à direcção da corda. Estas ondas, nas quais a perturbação é

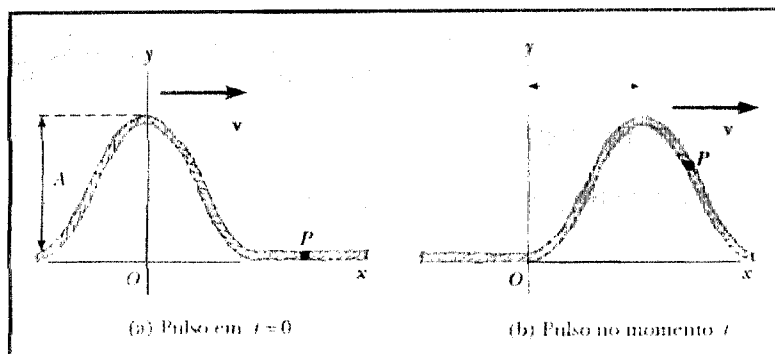
perpendicular à sua direcção de propagação, denominam-se de **Ondas Transversais**. Por seu turno, às ondas nas quais a perturbação é paralela à direcção de propagação atribui-se a denominação de **Ondas Longitudinais**.

As ondas acústicas num meio gasoso são um exemplo de ondas longitudinais, na medida em que as moléculas do gás, através do qual as ondas se propagam, oscilam para trás e para diante ao longo da linha de propagação, alternadamente comprimindo e rarefazendo o meio.



**Figura 7.3-** Exemplo de uma onda longitudinal gerada por um diapasão que se propaga através do ar.  
Retirado de: [http://www.citi.pt/estudos\\_multi/pedro\\_duarte/30.html](http://www.citi.pt/estudos_multi/pedro_duarte/30.html)

Considere-se um pulso numa corda num instante  $t = 0s$ , o qual pode ser representado por uma função do tipo  $y = f(x)$ . Se tomarmos em atenção um instante posterior, verificamos que o pulso avançou sobre a corda. Se utilizarmos um sistema de coordenadas com origem em  $O'$ , o qual avança com velocidade idêntica à do pulso, então, nesta situação podemos considerar este movimento como **estacionário**. Em cada instante a forma da corda neste sistema de coordenadas é descrita por  $f(x')$  em que  $x = x' + vt$  - **Figura 7.4**.



**Figura 7.4-** Pulso unidimensional propagando-se para a direita com uma velocidade  $v$ . **(a)** Em  $t = 0$ s a forma do pulso é dada por  $y = f(x)$ . **(b)** Num instante posterior  $t$ , a forma da onda mantém-se inalterada, mas o deslocamento na vertical de um ponto  $P$  é dado pela função  $y = f(x - vt)$  (Serway & Jewett, 1998).

No caso de uma onda que se propaga numa corda, a função de onda anteriormente apresentada representa o deslocamento transversal dos segmentos da corda. No caso de uma onda acústica no ar, esta função de onda representa o deslocamento longitudinal das moléculas. Por sua vez, estas funções de onda são soluções de uma equação diferencial, a qual pode ser deduzida recorrendo às **Leis de Newton**.

### 7.1.2- Velocidade de propagação de uma onda

É importante aqui referir, na medida em que esta será uma conclusão a retirar a partir dos resultados experimentais que serão obtidos numa das actividades aqui realizadas, que a velocidade de propagação de uma onda depende das propriedades do meio no qual esta se propaga.

Assim, no caso da propagação de um pulso ondulatório numa corda, podemos afirmar que quanto maior for a tensão estabelecida na corda mais rápida será a propagação da onda ao longo da mesma. Por outro lado, uma onda propaga-se tão mais rapidamente numa corda quanto menor for a densidade linear da mesma, mantendo constante a tensão aplicada à corda:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad [1]$$

em que  $F$  é a tensão,  $\mu$  a densidade linear (ou seja, a massa por unidade de comprimento) e  $v$  a velocidade de propagação da onda ao longo da corda.

No caso das **ondas acústicas** que se propagam num fluido como a água ou o ar, a velocidade de propagação da onda é dada por:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad [2]$$

em que  $\rho$  corresponde à densidade do meio e  $B$  ao módulo de compressibilidade.

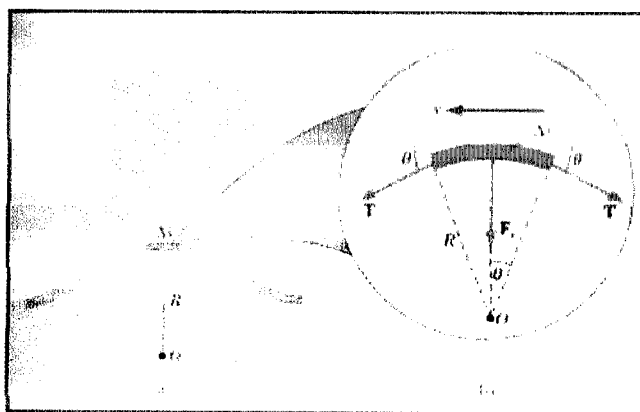
Como é patente, a velocidade de propagação da onda depende de uma propriedade elástica do meio (sendo esta a tensão numa corda ou o módulo de compressibilidade, no caso das ondas acústicas) e, por outro lado, de uma propriedade inercial do meio. No caso de um gás perfeito, o módulo de compressibilidade é proporcional à pressão, sendo esta por sua vez proporcional à densidade e temperatura absoluta do gás. Assim, a velocidade de propagação de uma onda acústica neste gás é dada por:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M}} \quad [3]$$

Nas condições normais de pressão e temperatura, pode-se afirmar que o ar tem um comportamento aproximado de gás perfeito.

### 7.1.3- Dedução da expressão que traduz a equação de onda

Tal como já foi referido anteriormente, pode-se recorrer às Leis de Newton para deduzir a equação de onda de uma onda que se propaga ao longo do segmento de uma corda, estudando o movimento da mesma à passagem da onda – **Figura 7.5**.



**Figura 7.5-** (a) Movimento de um pequeno segmento da corda de acordo com o sistema de referência utilizado. (b) A força resultante que actua num pequeno segmento da corda  $\Delta s$  apresenta uma direcção radial (Jewett & Serway, 1998).

Se focarmos a nossa atenção em pequenos deslocamentos verticais, isto implica que  $l = \Delta x$  e que por sua vez  $m = \mu \Delta x$ , em que  $\mu$  corresponde à densidade linear da corda. Ao determinar a resultante das forças na direcção vertical à corda, temos que:

$$\sum F = F \cdot \sin \theta_2 - F \cdot \sin \theta_1, \quad [4]$$

em que  $F$  corresponde à tensão aplicada na corda. Se fizermos a aproximação de que  $\sin \theta \approx \tan \theta$  (válida para valores de  $\theta \cong 0$ ), então:

$$\sum F = F \cdot (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \cong F \cdot (\tan \theta_2 - \tan \theta_1), \quad [5]$$

em que a tangente do ângulo formado entre a corda e a horizontal corresponde à inclinação da curva descrita pela corda ( $s$ ) e não é mais do que a derivada de  $y(x, t)$  em relação a  $x$ , mantendo

o tempo constante. Assim,  $\frac{\partial y}{\partial x} = \tan \theta = s$ , em que  $\frac{\partial y}{\partial x}$  é a derivada parcial de  $y$  em ordem a  $x$ .

Logo:

$$\sum F = F \cdot (s_2 - s_1) = F \cdot \Delta s, \text{ sendo } \Delta s = s_2 - s_1$$

Se aplicarmos a 2ª Lei de Newton,  $\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a}$ , então:  $F \cdot \Delta s = \mu \Delta x \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$ , ou equivalentemente:

$$F \cdot \frac{\Delta s}{\Delta x} = \mu \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

$$\text{Quando } \Delta x \rightarrow 0 \text{ temos que } \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta x} = \frac{\partial s}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

Assim, a equação de onda que traduz a propagação de uma onda numa corda sob tensão é dada por:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\mu}{F} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad [6]$$

Tendo em atenção que a forma geral para a equação de onda, no caso duma onda plana, é:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad [7]$$

$$\text{então: } v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

O próximo objectivo consiste em mostrar que a equação de onda tem como solução qualquer função do tipo  $y = y(x - vt)$ . Se considerarmos  $\alpha = x - vt$ , então:  $y = y(x - vt) = y(\alpha)$

$$\text{Sendo } y' = \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial y}{\partial \alpha} \text{ então: } \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial y}{\partial \alpha} \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial x} = y' \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial x} \Leftrightarrow \frac{\partial y}{\partial t} = \frac{\partial y}{\partial \alpha} \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial t} = y' \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial t}$$

$$\text{Sendo } \begin{cases} \frac{\partial \alpha}{\partial x} = 1 \text{ e } \frac{\partial \alpha}{\partial t} = -v \\ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = y'' \end{cases}$$

E logo para a equação de onda geral temos:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -v \frac{\partial y'}{\partial t} = -v \frac{\partial y'}{\partial \alpha} \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial t} = v^2 \cdot y'' \quad [8]$$

## 7.2- Ondas harmónicas

### 7.2.1- Propagação de uma onda harmónica numa corda

Se a extremidade de uma corda se encontrar fixa à haste de um diapasão que vibra na vertical com um movimento harmónico simples, então, neste caso propaga-se ao longo da corda uma onda sinusoidal- **Onda Harmónica**- a qual apresenta uma determinada forma dada pela função:  $y(x) = A \cdot \text{sen}(kx - \delta)$ , em que:

$A$  = Amplitude;

$K$  = Numero de onda;

$\delta$  = Constante de fase que depende de posição inicial da corda, para  $t=0$ .

Se considerarmos que  $x_2 = x_1 + \lambda$ , em que as posições designadas genericamente por  $x_1$  e  $x_2$  se encontram separadas por um comprimento de onda ( $\lambda$ ), então, verifica-se que:

$$y(x_1) = y(x_2), \text{ e logo } \text{sen}(k \cdot x_1) = \text{sen}(k \cdot x_2), \text{ ou seja:}$$

$$\text{sen}(kx_1) = \text{sen}k(x_1 + \lambda) = \text{sen}(kx_1 + k\lambda), \text{ em que } k \cdot \lambda = 2\pi \Rightarrow k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Se a onda se estiver propagando para a direita com uma velocidade designada por  $v$ , a variável  $x$  é substituída por  $x - vt$ , então:

$$y(x, t) = A \cdot \text{sen}.k(x - vt) = A \cdot \text{sen}(kx - kvt) \quad [9]$$

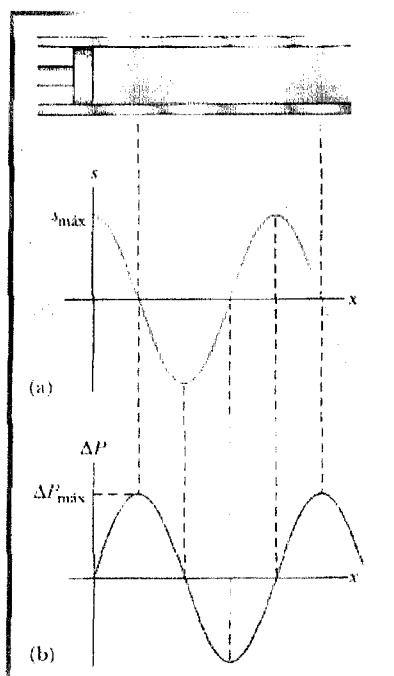
Relembremos que a forma de uma onda harmónica é dada por:  $y(x, t) = A \cdot \text{sen}(kx - \omega t)$ , em que

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f, \text{ e logo } 2\pi \cdot f = k \cdot v \Leftrightarrow v = f \cdot \lambda$$

As ondas harmónicas são caracterizadas por um único valor de frequência e um só comprimento de onda. Por outro lado, é possível mostrar que os pulsos ondulatorios se podem obter pela sobreposição de diversas ondas harmónicas.

### 7.2.2- Ondas sonoras harmónicas

Este tipo de ondas pode ser gerado no ar recorrendo à utilização de um diapasão ou através de um altifalante que vibre com movimento harmónico simples. A fonte de vibração provoca a oscilação, também com um MHS, das moléculas que constituem o meio. Por sua vez, estas moléculas colidem com as moléculas vizinhas, provocando nestas oscilações idênticas. Este é o processo que permite explicar o modo de propagação do som no ar.



**Figura 7.6-** (a) Representação gráfica da variação da amplitude de deslocamento em função da posição.  
(b) Representação gráfica da variação da amplitude de pressão em função da posição. Retirado de: <http://www.essi.fr/~leroux/crim2/img4sinus.gif>.

No caso de uma onda sonora que se propaga no ar, o deslocamento das moléculas em relação à sua posição de equilíbrio  $s(x,t)$  é dado por:

$$s(x,t) = s_0 \cdot \text{sen}(kx - \omega t) \quad [10]$$

em que  $s(x,t)$  substitui a função de onda  $y(x,t)$  apresentada para o caso de uma corda.

Neste caso, os deslocamentos estão orientados na direcção do movimento da onda, provocando variações nos valores da densidade e da pressão do ar. Se partirmos do princípio que a pressão de um gás é proporcional à sua densidade, então a variação de pressão é máxima quando a variação de densidade também for máxima- **Figura 7.6**. Relativamente às ondas de pressão e de deslocamento, estas apresentam uma diferença de fase de  $90^\circ$ . Desta forma, quando o deslocamento é nulo, a variação de pressão é máxima ou mínima, por seu turno, quando o deslocamento é máximo ou mínimo, as variações de pressão ou de densidade são nulas (Tipler, 1991).

A onda de deslocamento dada pela equação  $s(x,t) = s_0 \cdot \text{sen}(kx - \omega t)$  acarreta a onda de pressão dada por:

$$p = p_0 \cdot \text{sen}\left(kx - \omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad [11]$$

em que  $p$  corresponde à variação de pressão (em relação à pressão de equilíbrio) e  $p_0$  corresponde ao máximo desta variação de pressão. Podemos relacionar  $p_0$  com a amplitude de deslocamento  $s_0$  do seguinte modo:

$$p_0 = \rho \cdot \omega \cdot v \cdot s_0 \quad [12]$$

em que  $v$  corresponde à velocidade de propagação e  $\rho$  à densidade do gás no estado de equilíbrio.

Quando uma onda sonora se propaga no ar, o deslocamento das moléculas de ar, a pressão e a densidade do meio variam sinusoidalmente com uma frequência que é idêntica à da fonte de vibração.

É ainda importante referir que o ouvido humano é sensível a sons com uma frequência situada aproximadamente entre os 20 Hz e os 20000 Hz, sendo que algumas pessoas têm uma audição bastante limitada a frequências acima de 15000 Hz.



### 7.2.3- Frentes de onda: Ondas planas e ondas circulares

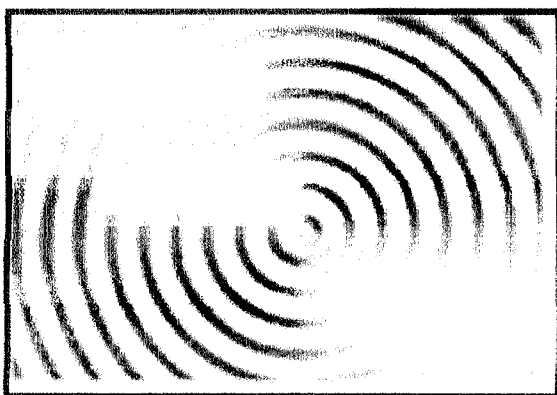


Figura 7.7- Ondas geradas numa tina de ondas por uma fonte puntiforme.

Na **Figura 7.7** representam-se as ondas geradas numa tina de ondas por uma fonte puntiforme que oscila para cima e para baixo num movimento harmónico simples. O comprimento de onda corresponde à distância entre as cristas de ondas sucessivas (círculos concêntricos), correspondendo cada círculo a uma frente de onda (lugar geométrico dos pontos que se encontram com a mesma fase).

No caso de uma fonte sonora puntiforme, as ondas geradas movem-se no espaço tridimensional, originando frentes de onda com a forma de superfícies esféricas concêntricas.

O movimento das frentes de onda pode ser indicado segundo raios, os quais constituem setas orientadas com uma direcção perpendicular à frente de onda. No caso de um meio homogéneo, como é o caso do ar, em que a densidade se pode considerar aproximadamente constante, uma onda desloca-se na direcção dos raios rectilíneos. Para distâncias consideráveis em relação à fonte puntiforme, uma pequena parte de uma frente de onda pode ser aproximada a um plano: **Onda Plana**. Num tanque de ondas podem gerar-se ondas planas por meio de uma lâmina rectilínea que oscila na água para baixo e para cima, de forma alternada (Kinsler, 1976; Tipler, 1991).

A intensidade de uma onda plana (potência média por unidade de área) pode ser expressa em termos da densidade média de energia ( $\eta_{média}$ ) e da velocidade de propagação da onda ( $v$ ), através de  $I = \eta_{média} \cdot v$ . No caso de ondas sonoras que se propagam no ar:

$$\eta_{média} = \frac{\rho \cdot \omega^2 \cdot s_0^2}{2} = \frac{p_0^2}{2 \cdot \rho \cdot v} \quad [13]$$

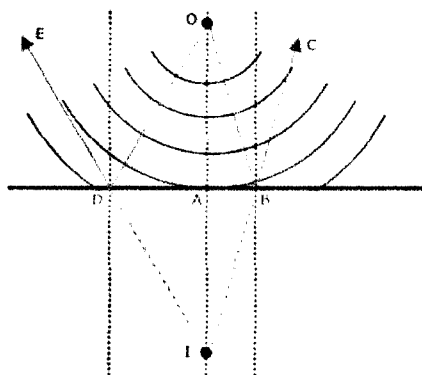
(Esta equação será posteriormente deduzida)

Daqui se conclui que a intensidade de uma onda sonora é proporcional ao quadrado da sua amplitude (sendo esta uma propriedade geral de qualquer onda harmónica). No que respeita ao ouvido humano, este opera numa vasta gama de intensidades de ondas sonoras, que vão desde aproximadamente  $10^{-12} \text{ W/m}^2$  (que se admite ser o limiar da audição) até um valor de cerca de  $1 \text{ W/m}^2$ , sendo que este último valor provoca uma dolorosa sensação na maioria das pessoas.

No caso particular duma fonte puntiforme, a intensidade da onda depende da distância à fonte. Se uma fonte puntiforme emitir uniformemente em todas as direcções, então, a energia das ondas a uma distância  $r$  da fonte distribui-se uniformemente sobre uma superfície esférica de raio  $r$  e área dada por  $A = 4.\pi.r^2$ . Designando por  $P$  a potência da fonte emissora, a potência por unidade de área à distância  $r$  da fonte é dada por  $\frac{P}{4.\pi.r^2}$ .

### ***7.3- Comportamento de uma onda quando esta se depara com um obstáculo ao longo da sua propagação***

#### ***7.3.1- Reflexão, refração e difracção***



**Figura 7.8-** Reflexão de uma onda. Retirado de: <http://www.mspc.eng.br/eleomag/opt2A.asp>

Quando uma onda incide numa zona do espaço que é uma fronteira que separa duas regiões que se caracterizam por diferentes velocidades de propagação, acontece que parte desta onda pode ser reflectida e a outra parte transmitida. A três dimensões, a fronteira que separa as duas regiões, nas quais os valores da velocidade de propagação das ondas são diferentes, constitui uma superfície de separação. Podemos dar o exemplo de uma onda sonora no ar ao incidir sobre a

superfície de separação com um outro meio. Observando o fenómeno de refacção, verifica-se que o raio refractado se aproxima ou se afasta da normal à superfície de separação, dependendo do índice de refacção relativo dos dois meios, o que por sua vez se relaciona com o facto da velocidade da onda no primeiro meio tomar um valor superior ou inferior à velocidade de propagação no segundo meio.

Na situação em que a velocidade da onda no segundo meio é maior que a velocidade no meio original, o raio propagado no segundo meio afasta-se da normal. Por outro lado, à medida que o ângulo de incidência aumenta, aumenta também o ângulo de refacção, até que se atinge um ângulo de incidência crítico para o qual o ângulo de refacção é de  $90^\circ$ . Se o ângulo de incidência for maior que este ângulo crítico, não há raio refractado e tem lugar o fenómeno denominado de **Reflexão Interna Total**.

É importante salientar que a quantidade de energia reflectida por uma superfície depende das características da mesma. Por exemplo, as paredes, os soalhos e os tectos são bons reflectores de ondas sonoras. Por outro lado, materiais porosos como tecidos e revestimentos de móveis, apresentam uma elevada capacidade de absorção do som. A reflexão das ondas sonoras tem um papel importante no projecto de uma sala de aula, de uma biblioteca ou de um auditório de música. Por exemplo, se a sala de aula tiver muitas superfícies reflectoras, é difícil entender a fala, pois o ouvinte é atingido em simultâneo por múltiplas ondas reflectidas em diferentes direcções. Estas reflexões são reduzidas se colocarmos um material absorvente nas paredes e no tecto destas salas. Nalgumas salas de espectáculos é colocado um anteparo reflector por detrás da orquestra, fixando-se painéis reflectores no tecto da sala de modo a reflectir e fazer convergir o som na direcção do conjunto de ouvintes presentes na mesma (Salgado, 2005).

Quando uma onda encontra um obstáculo há uma tendência desta em se curvar em torno deste mesmo obstáculo. Por outro lado, quando uma onda incide sobre uma superfície provida de uma pequena abertura, esta passa através da mesma propagando-se depois como uma onda esférica ou circular- **Fenómeno de Difracção**. Nesta segunda situação, as partículas são impedidas de prosseguir o seu movimento, ou então estas passam directamente através da abertura. Pode-se, assim, afirmar que a difracção é um fenómeno físico que permite distinguir uma onda de um feixe de partículas consideradas de grandes dimensões, quando comparadas com o objecto ou abertura em que incidem (Freedman & Young, 2003).

Embora as ondas que encontram um obstáculo ou uma abertura sofram sempre o fenómeno de difracção, a extensão do mesmo depende do comprimento de onda da onda em

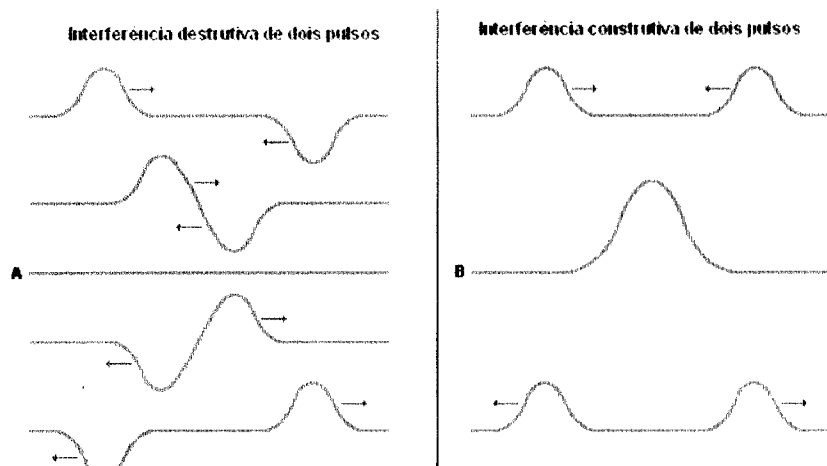
causa, comparado com as dimensões do obstáculo ou da abertura. Verifica-se que se o comprimento de onda for elevado em relação às dimensões da abertura, então os efeitos da difracção são notórios e as ondas propagam-se através da abertura como se fossem emitidas por uma fonte puntiforme. Por outro lado, se o comprimento de onda for pequeno em comparação com as dimensões da abertura, então, o efeito da difracção é pouco significativo. Tendo em atenção que os comprimentos de onda dos sons audíveis são em geral elevados quando comparados com as dimensões das aberturas e dos obstáculos comuns, então, se concluiu que a difracção das ondas sonoras é bastante comum e fácil de ser observada. Se as ondas de determinado comprimento de onda forem utilizadas para localizar um corpo, a sua posição será conhecida com uma aproximação de  $\pm\lambda$ . A título de exemplo pode-se referir que o menor comprimento de onda de um som audível no ar é de cerca de 2 cm, razão pela qual a utilização de sons audíveis não permite localizar objectos a distâncias inferiores a 2 cm (Freedman & Young, 1977).

#### ***7.4- Sobreposição de ondas e a geração de ondas estacionárias***

De um modo bastante genérico podemos afirmar que quando as ondas se cruzam no espaço, as perturbações causadas por cada uma delas (traduzidas matematicamente pelas respectivas funções de onda) se sobrepõem (adicionam-se algebricamente) formando uma nova onda, que resulta da combinação linear das iniciais. A este fenómeno de sobreposição de duas ondas atribui-se o nome de *Interferência*.

A interferência é um importante fenómeno ondulatório, de tal forma que foi a observação do fenómeno de interferência da radiação electromagnética por Young, em 1801, que levou à compreensão de que a luz é um fenómeno ondulatório.

Considere-se a situação em que dois pulsos ondulatórios se deslocam em direcções opostas numa mesma corda sob tensão.



**Figura 7.9-** Pulsos ondulatórios que se deslocam ao longo de uma corda em direcções opostas, sendo a forma da onda quando os pulsos se encontram dada pela soma algébrica dos deslocamentos de cada pulso em separado. Na situação específica em que os dois pulsos são idênticos, mas invertidos um relativamente ao outro, existe um momento em que os pulsos se sobrepõem exactamente e a sua soma é nula. Neste instante, a corda encontra-se completamente esticada segundo a horizontal. No entanto, esta não se encontra em repouso. Retirado de <http://colfem.com/Webfisica/vibraciones.htm>

Segundo o chamado **Princípio da Sobreposição**, quando duas ondas se sobrepõem, a onda resultante é a soma algébrica das ondas individuais. Matematicamente, quando dois ou mais pulsos se propagam numa corda, a função de onda resultante é a soma algébrica das funções de onda dos respectivos pulsos. É importante também salientar que a sobreposição é uma propriedade característica do movimento ondulatório, sendo esta uma consequência da equação de onda. Para tal note-se que:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\mu}{F} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \text{ ou, equivalentemente: } \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad [14]$$

o que mostra que esta equação é linear (Isto significa que a função  $y(x, t)$  e as suas derivadas só aparecem na equação elevadas à primeira potência). Consequentemente, se  $y_1$  e  $y_2$  constituem duas soluções diferentes da função de onda, então:

$$y_3 = c_1 \cdot y_1 + c_2 \cdot y_2, \quad [15]$$

(em que  $c_1$  e  $c_2$  são constantes arbitrárias), também constitui uma solução desta equação. Esta é uma propriedade importante das equações lineares: se duas funções de onda quaisquer satisfizerem a equação de onda, então a sua soma algébrica também constitui uma solução desta equação (Everest, 2001; Jewett & Serway, 2002).

### 7.4.1- Interferência de ondas harmônicas

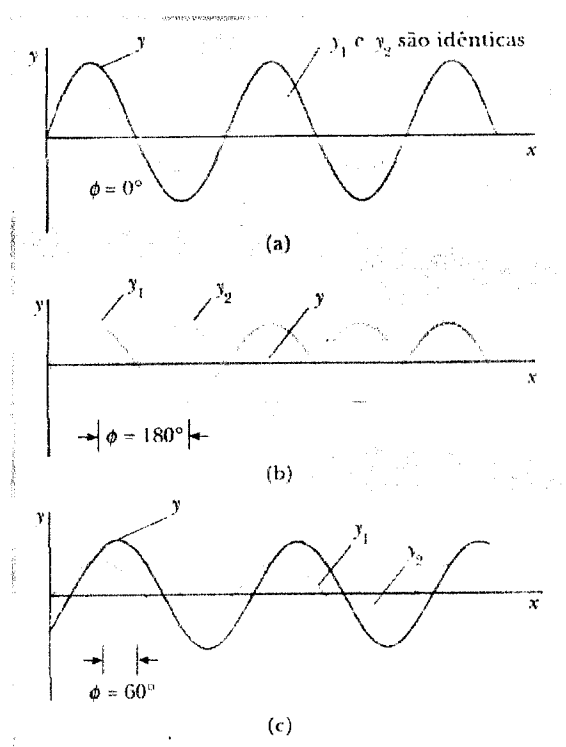
O resultado da sobreposição de duas ondas harmônicas depende da diferença de fase existente entre ambas. Consideremos a título de exemplo a função de onda de uma onda harmônica, denominada genericamente por  $y_1$ , que avança para a direita com uma amplitude  $y_0$ , frequência angular  $\omega$  e número de onda  $k$ , de acordo com a seguinte equação:

$$y_1 = y_0 \cdot \text{sen}(kx - \omega t) \quad [16]$$

Considere-se uma segunda função de onda harmônica, também avançando para a direita com uma amplitude, frequência e número de onda idêntico à primeira e cuja equação de onda geral é dada por:

$$y_2 = y_0 \cdot \text{sen}(kx - \omega t + \phi) \quad [17]$$

em que  $\phi$  corresponde à diferença de fase existente entre ambas as ondas.



**Figura 7.10-** Sobreposição de duas ondas harmônicas idênticas  $y_1$  e  $y_2$ . **(a)** Quando as duas ondas se encontram em fase, ocorre uma interferência construtiva. **(b)** Quando as duas ondas se encontram desfasadas de  $\pi$  radianos, ocorre um processo de interferência destrutiva. **(c)** Quando o ângulo de fase tem um valor diferente de 0 ou  $\pi$  rad., ocorre uma situação intermédia às duas apresentadas anteriormente (Jewett & Serway, 2002).

Podemos escrever que:

$$\text{sen}\theta_1 + \text{sen}\theta_2 = 2 \cdot \cos \frac{1}{2}(\theta_1 - \theta_2) \cdot \text{sen}\left(\frac{1}{2}\right)(\theta_1 + \theta_2)$$

Relembrando que:

$$\theta_1 = k \cdot x - \omega \cdot t \text{ e } \theta_2 = k \cdot x - \omega \cdot t + \phi, \text{ então:}$$

$$\frac{1}{2} \cdot (\theta_1 - \theta_2) = -\frac{1}{2} \cdot \phi$$

E logo a equação que traduz o resultado da sobreposição de duas ondas caracterizadas por valores de amplitude e frequência idênticos é:

$$y_1 + y_2 = (2 \cdot y_0 \cdot \cos \frac{1}{2} \phi) \text{sen}(kx - \omega t + \frac{1}{2} \phi) \quad [18]$$

Desta forma, pode-se concluir que a sobreposição de duas ondas harmônicas com valores de número de onda e frequência idênticos origina uma onda harmônica caracterizada pelo mesmo valor de número de onda e frequência das duas ondas originais. A onda resultante tem, no entanto, uma fase diferente das fases das duas ondas originais e uma amplitude dada por  $2 \cdot y_0 \cdot \cos(\frac{\phi}{2})$ . Desta forma, podemos facilmente concluir que se as duas ondas se encontrarem em fase, então  $\phi = 0$  e  $\cos \phi = 1$ , e logo, a amplitude da onda resultante é de  $2 \cdot y_0$ . A este processo de interferência em que as duas ondas iniciais se encontram em fase dá-se o nome de **Interferência Construtiva**.

Por outro lado, se as duas ondas estiverem desfasadas de  $180^\circ$ , ou seja,  $\phi = \pi$  então  $\cos(\frac{\pi}{2}) = 0$  e a amplitude da onda resultante é nula. O fenómeno de interferência que tem lugar entre duas ondas com diferenças de fase de  $180^\circ$  é denominado de **Interferência Destrutiva** (Serway & Jewett, 2002).

### 7.4.2- O fenômeno dos batimentos

A interferência de duas ondas sonoras de frequências ligeiramente diferentes provoca um fenômeno extremamente interessante denominado de *Batimentos*. No estudo deste fenômeno, ir-se-ão considerar duas ondas sonoras com frequências angulares dadas por  $\omega_1$  e  $\omega_2$  e com a mesma amplitude de pressão, denominada genericamente por  $p_0$ . Neste contexto, levanta-se a seguinte questão: “O que ouvimos nós quando estas duas ondas se sobrepõem no espaço?”

Para tal, ir-se-á considerar a dependência temporal das duas ondas num determinado ponto:

$$p_1 = p_0 \cdot \text{sen}(\omega_1 t) \text{ e } p_2 = p_0 \cdot \text{sen}(\omega_2 t),$$

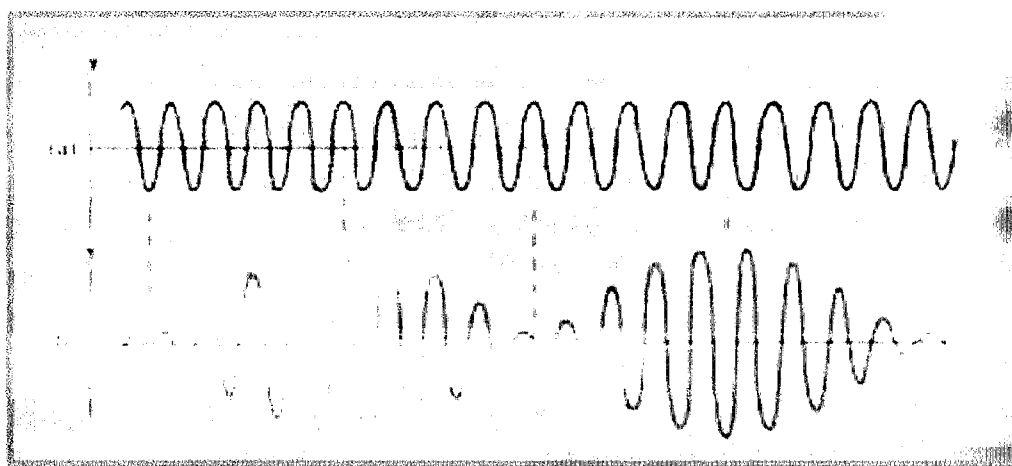
de onde se obtém:

$$p = p_0 \cdot \text{sen}(\omega_1 t) + p_0 \cdot \text{sen}(\omega_2 t) = 2 \cdot p_0 \cdot \cos\left[\frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)t\right] \cdot \text{sen}\left[\frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)t\right]$$

Logo  $p = 2 \cdot p_0 \cdot \cos\left(\frac{1}{2} \Delta\omega t\right) \cdot \text{sen} \omega_{\text{méd}} t$ , ou seja:

$$p = 2 \cdot p_0 \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{1}{2} \Delta f t\right) \cdot \text{sen } 2\pi \cdot f_{\text{méd}} t \quad [19]$$

em que  $\omega_{\text{média}} = 2\pi \cdot f_{\text{média}}$  e  $\Delta\omega = 2\pi \cdot \Delta f$



**Figura 7.11-** O fenômeno dos batimentos originados pela combinação de duas ondas com frequências ligeiramente diferentes. (a) Representação de cada uma das ondas harmônicas. (b) A onda combinada possui uma amplitude (linha a tracejado) que oscila no tempo. (Serway & Jewett, 2002).



Inicialmente as ondas encontram-se em fase e interferem construtivamente no instante  $t = 0$ . No entanto, como os valores das suas frequências são ligeiramente diferentes, as ondas começam a ficar fora de fase no decorrer do tempo, acabando finalmente por se encontrar desfasadas. De tal forma que num instante  $t_1$  as duas ondas encontram-se desfasadas de  $180^\circ$ , gerando-se um fenómeno de interferência destrutiva. Num intervalo de tempo idêntico e posterior as duas ondas encontram-se novamente em fase e a interferência é construtiva. Conclui-se que quanto maior for a diferença entre as frequências das duas ondas, mais rapidamente estas oscilam de uma situação de fase para outra em que se encontram desfasadas. Desta forma, o som que ouvimos tem uma frequência dada por  $\frac{f_1 + f_2}{2}$  e uma amplitude dada por  $2 \cdot p_0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot \Delta f \cdot t}{2}\right)$ .

Nesta situação, a amplitude do movimento oscila com uma frequência  $\frac{\Delta f}{2}$  e, consequentemente, a frequência de batimento é igual à diferença de frequências das duas ondas.

Por exemplo, se tocarmos dois diapasões um com uma frequência de 241 Hz e outro com a frequência de 243 Hz, ouviremos um som pulsante com uma frequência média de 242 Hz e um máximo de intensidade duas vezes por segundo. Ou seja, a frequência dos batimentos é de 2 Hz. É importante termos noção que o ouvido humano pode perceber até cerca de 15 a 20 batimentos por segundo. Acima desta frequência, as flutuações de intensidade são demasiado rápidas e não se conseguem distinguir (Tipler, 1991).

O fenómeno dos batimentos é usualmente utilizado para comparar uma frequência conhecida e outra desconhecida como, por exemplo, para afinar um piano. Desta forma, as notas são afinadas fazendo-se soar simultaneamente a nota de um diapasão e a nota do piano. Nesta situação, procede-se de forma a ajustar a tensão na corda do piano até que os batimentos sejam imperceptíveis, o que implica a existência de uma diferença muito pequena entre a frequência dos dois sons em causa.

### **7.4.3- O conceito de coerência em movimentos ondulatórios**

Duas ondas não têm necessariamente de se encontrar em fase para que seja possível observar o fenómeno da interferência. Para tal, considere-se duas fontes que estejam desfasadas de  $\pi$  radianos. Neste caso, nos pontos em que a diferença de percurso é um número inteiro de comprimentos de onda, a interferência é destrutiva, pois as ondas apresentam uma diferença de fase inicial de  $180^\circ$ . Por sua vez, nos pontos onde a diferença de percurso é um número ímpar do comprimento de onda, as ondas encontram-se em fase em virtude da sua diferença de fase inicial de  $180^\circ$ .

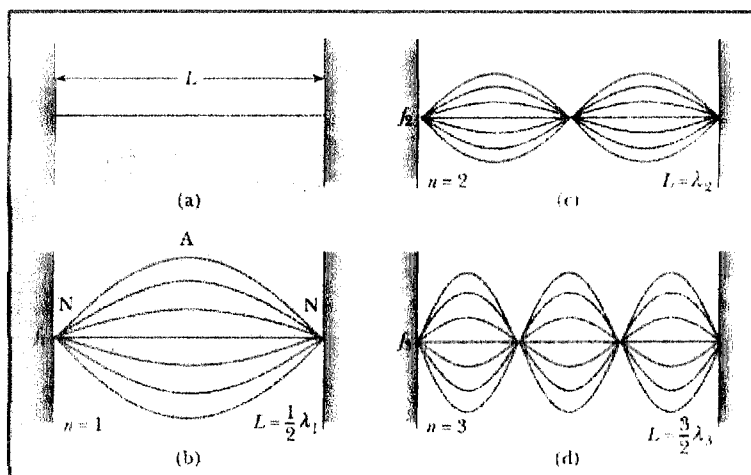
Figuras de interferência deste tipo podem ser provocadas pela sobreposição de ondas de duas fontes quaisquer cuja diferença de fase se mantenha constante no tempo. Duas fontes que se encontram em fase ou que têm uma diferença de fase constante são chamadas de **Coerentes**. Pelo contrário, as fontes de onda que não mantêm entre si uma diferença de fase constante no tempo, na medida em que estas diferenças variam aleatoriamente, são denominadas de fontes **Incoerentes**. Podemos dar o exemplo de dois altifalantes alimentados por diferentes amplificadores, ou dois violinos tocados por dois músicos diferentes. No caso de fontes incoerentes, a interferência das ondas num ponto do espaço varia rapidamente e aleatoriamente de uma forma construtiva para uma destrutiva, não se verificando uma figura de interferência estável no tempo (Halliday, 1978).

### **7.4.4- Ondas estacionárias**

Quando as ondas se encontram confinadas no espaço, por exemplo, as ondas que se propagam nas cordas de um piano, ou as ondas sonoras que se propagam no interior dos tubos de um órgão, as reflexões nas extremidades da corda ou do tubo fazem com que existam ondas se deslocando em direcções opostas, ocorrendo a combinação destas ondas de acordo com o princípio da sobreposição. Se considerarmos uma corda vibrante, existem determinadas frequências para as quais a sobreposição das diferentes ondas provoca uma figura de vibração estacionária- **Ondas estacionárias**. O estudo deste tipo de ondas é muito importante em áreas como a Música ou a Mecânica Quântica.

#### 7.4.4.1- A propagação de ondas numa corda fixa nas duas extremidades

No caso em que uma corda sob tensão se encontra fixa nas duas extremidades, verifica-se que se esta for excitada por um movimento harmónico simples de pequena amplitude, determinadas frequências originam configurações de ondas estacionárias. Os valores de frequências responsáveis por estas configurações são denominados de **Frequências de Ressonância da corda**, sendo que as respectivas funções de onda constituem um modo de vibração da corda. À frequência de ressonância mais baixa, também chamada de frequência fundamental, está associada uma onda estacionária que é denominada de **Modo Fundamental ou 1º Harmónico de Vibração- Figura 9.13**.



**Figura 7.12-** (a) Representação de uma corda de comprimento  $L$  fixa nas duas extremidades. (b) Frequência fundamental ou primeiro harmónico. (c) Segundo harmónico. (d) Terceiro harmónico (Jewett & Serway, 2002).

À frequência de ressonância com um valor imediatamente superior,  $f_2$  está associada uma onda estacionária, designada de 2º harmónico.

Pela análise dos diferentes harmónicos podemos verificar que existem pontos da corda que permanecem imóveis, os quais se designam de **Nós**. Entre cada par de nós sucessivos observa-se a existência de um ponto de amplitude de vibração máxima (**antinó ou ventre**). Deste modo, verifica-se que as duas extremidades da corda são nós, existindo um ventre no 1º harmónico, dois no 2º harmónico, e assim sucessivamente.

Um aspecto importante consiste em relacionar as frequências de ressonância com a velocidade de propagação da onda na corda e com o comprimento desta mesma corda. O comprimento  $L$  da corda corresponde a metade do comprimento de onda no modo fundamental de

vibração, verificando-se que no 2º harmónico o valor de  $L$  é igual a dois meios comprimentos de onda, a três meios comprimentos de onda do 3º harmónico e assim sucessivamente. Se denominarmos por  $\lambda_n$  o comprimento de onda do  $n$ -ésimo harmónico, então:

$$L = \frac{n \cdot \lambda_n}{2} \quad [20]$$

sendo esta a condição imposta para a geração de ondas estacionárias numa corda fixa nas duas extremidades.

A formação de ondas estacionárias poderá ser vista como resultado de um processo de ressonância. Para tal, considere-se uma corda de comprimento  $L$  presa por uma extremidade à haste de um diapasão e fixa na outra extremidade. Desta forma, a primeira onda gerada pelo diapasão avança pela corda e percorre a distância  $L$ , reflectindo-se na ponta fixa, sendo invertida neste local. Esta onda reflectida avança na direcção oposta, percorrendo a distância  $L$ , sendo por sua vez reflectida no diapasão e invertida. Nesta situação, o tempo total de ida e volta da onda é de  $\frac{2L}{v}$ . Se este intervalo de tempo corresponder a um período da vibração do diapasão, então, a onda duplamente reflectida sobrepõe-se exactamente à 2ª onda gerada pelo diapasão. Nesta altura, as duas ondas interferem construtivamente e a onda resultante tem o dobro da amplitude inicial. Esta onda combinada, desloca-se até à outra extremidade da corda e retorna ao diapasão, sobrepondo-se à 3ª onda gerada, triplicando a sua amplitude. Nesta situação podemos afirmar que o diapasão se encontra em ressonância com a corda. O processo de ressonância também tem lugar se o tempo que a primeira onda leva a percorrer a distância  $2L$  for o dobro do período do diapasão, ou qualquer múltiplo deste período (Freedman & Young, 2003).

$$\text{Condição de ressonância:} \quad \frac{2L}{v} = n \cdot T = \frac{n}{f} \quad \text{ou} \quad f = \frac{n \cdot v}{2L},$$

em que  $T = \frac{1}{f}$  é o período do diapasão.

Note-se que neste processo os efeitos do amortecimento, assim como os da perda de energia nas reflexões, ou ainda uma flexibilidade imperfeita da corda impõem limites à amplitude máxima que poderá ser atingida pela corda ao longo da sua oscilação.

Convém acrescentar que se uma extremidade da corda se encontrar presa à haste de um diapásão e este estiver imóvel, então esta extremidade continuará a ser, em boa aproximação, um nó, pois a amplitude das vibrações desta é muito inferior à amplitude dos ventres.

Na situação em que a frequência de vibração do diapásão não coincide com nenhuma das frequências naturais da corda, verifica-se que não se estabelecem ondas estacionárias na corda. Desta forma, a primeira onda gerada, depois de ter percorrido a distância  $2L$  e ser reflectida pelo diapásão, apresenta uma diferença de fase com a onda que está a ser gerada pelo diapásão. Quando a onda resultante tiver percorrido a distância  $2L$  e retornado ao diapásão, esta se encontra novamente com uma diferença de fase relativamente à onda gerada.

Em média, verifica-se que a amplitude da onda resultante não aumenta, permanecendo na mesma ordem de grandeza da amplitude da primeira onda, a qual corresponde à amplitude de vibração da haste do diapásão. No entanto, convém notar que esta amplitude é muito pequena quando comparada com as atingidas nas frequências de ressonância.

A formação das ondas estacionárias na corda é análoga ao fenómeno de ressonância do oscilador harmónico simples excitado por uma força externa também harmónica. No entanto, o oscilador tem apenas uma frequência natural, enquanto que a corda vibrante tem uma sequência de frequências naturais, múltiplos da frequência fundamental- *Série Harmónica*.

#### **7.4.4.2- Funções de onda das ondas estacionárias**

Quando uma corda vibra no seu  $n$ -ésimo modo, um segmento da corda oscila com um movimento harmónico simples, sendo a função deslocamento dada por:

$$\varphi_n(x, t) = A_n(x) \cdot \cos(\omega_n t + \delta_n) \quad [21]$$

em que  $\omega_n$  corresponde à frequência angular,  $\delta_n$  é uma constante de fase que depende das condições iniciais e  $A_n(x)$  é a amplitude, a qual depende da localização do segmento.

No instante em que a vibração apresenta um valor máximo para a sua amplitude, a forma da corda vibrando no  $n$ -ésimo harmónico é dada por:

$$A_n(x) = A_n \cdot \sin k_n x \quad [22]$$

em que  $k_n = \frac{2\pi}{\lambda_n}$  corresponde ao número de onda. Nesta situação, a função de onda de uma onda estacionária do  $n$ -ésimo harmónico é dada por:

$$\varphi_n(x, t) = A_n(x) \cdot \sin(k_n x) \cdot \cos(\omega_n t + \delta_n) \quad [23]$$

#### **7.4.4.3- Ondas sonoras estacionárias**

Um exemplo comum de ondas estacionárias é o das ondas geradas no interior da coluna de ar num tubo de órgão. Num tubo de órgão do tipo labial, uma corrente de ar é dirigida contra a borda aguda de uma abertura. No interior deste, o complicado movimento do ar nas vizinhanças da borda do tubo provoca vibrações na coluna de ar no tubo. As frequências de ressonância do tubo dependem do seu comprimento e do facto do tubo ser fechado ou aberto. Na situação em que o tubo do órgão se encontra aberto, a pressão nas duas extremidades é igual a  $p_0$  e esta mantém-se constante. Desta forma, existe um nó de pressão em cada extremidade.

É feita a aproximação de considerar que a onda sonora no tubo é uma onda unidimensional, o que é razoável no caso em que o diâmetro do tubo é muito menor que o comprimento da onda. Na prática, os nós de pressão estão um tanto afastados de cada uma das extremidades. No caso de um órgão fechado (aberto numa extremidade e fechado na outra) existe um nó de pressão que se localiza nas vizinhanças da abertura e um ventre de pressão localizado na extremidade fechada. A condição para a geração de uma onda estacionária no sistema coincide com a da corda fixa numa extremidade e livre na outra. O comprimento efectivo do tubo é um múltiplo ímpar de  $\lambda/4$ , ou seja, o comprimento de onda no modo fundamental é igual a quatro vezes o comprimento efectivo do tubo, encontrando-se presentes apenas os harmónicos ímpares.

Tal como já vimos anteriormente, a onda sonora pode ser descrita como uma onda de pressão ou uma onda de deslocamento. Numa onda sonora, as variações de pressão e de deslocamento encontram-se desfasadas de  $\frac{\pi}{2}$  radianos. Assim, numa onda sonora estacionária, os nós de pressão são os ventres de deslocamento e vice-versa. Desta forma, a extremidade aberta de um tubo de órgão corresponde a um nó de pressão e a um ventre de deslocamento, enquanto que a extremidade fechada é um ventre de pressão e um nó de deslocamento (Tipler, 1991).

Convém, ainda, acrescentar que a maior parte dos instrumentos musicais de sopro é bastante mais complexa que um simples tubo cilíndrico. Por exemplo, o tubo cónico, que é a base do oboé, do fagote, do corbe-inglês e do saxofone, vibram com a série harmónica completa e uma frequência fundamental em que o comprimento de onda é o dobro do comprimento do cone. Por sua vez, os metais da orquestra são combinações de cones e cilindros.

#### 7.4.4.4- A sobreposição de ondas estacionárias

Tal como já foi referido anteriormente, existe um conjunto de frequências de ressonância naturais, as quais conduzem à produção de ondas sonoras estacionárias em colunas de ar ou em cordas vibrantes que se encontrem fixas apenas numa ou nas duas extremidades. Refira-se a título de exemplo, o caso de uma corda fixa nas duas extremidades, na qual a frequência do modo fundamental de vibração é dada por:

$$f_1 = \frac{v}{2L} \quad [24]$$

$$y_1(x, t) = A_1 \cdot \text{sen} k_1 x \cdot \cos(\omega_1 t + \delta_1) \text{ em que } \omega_1 = 2\pi f_1$$

Em geral, um sistema não vibra num único modo harmónico, sendo o seu movimento oscilatório o resultado da mistura de diversos harmónicos. Desta forma, a função de onda é uma combinação linear de todas as funções de onda harmónicas possíveis, sendo dada por:

$$\psi(x, t) = \sum_n A_n \cdot \text{sen}(k_n x) \cdot \cos(\omega_n t + \delta_n) \quad [25]$$

Em que  $k_n = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_n}$  e  $\omega_n = 2 \cdot \pi \cdot f_n$ , sendo  $A_n$  e  $\delta_n$  constantes, que apenas dependem da posição e da velocidade inicial do sistema vibrante.

Um exemplo interessante de estudar é o de uma harpa que é dedilhada no seu centro, sendo a forma inicial simétrica em relação ao ponto  $x = \frac{L}{2}$ . Nesta situação, em que o movimento de vibração das cordas permanece simétrico em torno deste ponto, verifica-se que apenas os harmónicos ímpares, que também são simétricos em torno de  $x = \frac{L}{2}$ , são excitados. Por sua vez, os harmónicos pares, que são anti-simétricos em relação a  $x = \frac{L}{2}$ , não são excitados. Ou seja, a constante  $A_n$  mencionada anteriormente é nula para todo o  $n$  par (Tipler, 1991).

#### **7.4.4.5- Análise harmónica e síntese harmónica**

Quando um clarinete ou um oboé soam a mesma nota, se compararmos, por exemplo, o lá de afinação da orquestra, verificamos que o som produzido pelos dois instrumentos soa bastante diferente. Podemos afirmar que as notas têm a mesma altura, ou seja, provocam uma sensação de som agudo ou de som grave, a qual se encontra relacionada com a respectiva frequência. No entanto, as notas diferem numa característica denominada por **Timbre**. A diferença de timbre entre as duas notas está relacionada com os harmónicos que acompanham a frequência fundamental emitida pelos dois instrumentos. Estes harmónicos apresentam intensidades relativas, as quais dependem do instrumento em causa. Desta forma, pode-se afirmar que se os instrumentos soassem exclusivamente na frequência fundamental, então, verificar-se-ia que os sons produzidos por ambos seriam idênticos.

Por último, é importante salientar que as formas das diferentes ondas produzidas podem ser desdobradas nos harmónicos que as constituem. Este processo designa-se por *Análise Harmónica*, também chamada de *Análise de Fourier*.



## Capítulo 8

*Ideias dos alunos sobre o conceito de  
som e fenómenos ondulatórios*

São muitas as dificuldades manifestadas pelos alunos relativamente à temática dos movimentos ondulatórios, mais especificamente no estudo das ondas sonoras, desde a compreensão do conceito de onda e a sua forma, até ao modo de propagação e o mecanismo que tem lugar no ouvido humano, o qual nos permite ouvir determinados sons e que faz com que outros nos sejam completamente imperceptíveis.

Nesta fase do trabalho tentar-se-á apresentar, embora de um modo um pouco geral, algumas das dificuldades mais comuns aos alunos sobre os conceitos e conteúdos em causa, assim como algumas das concepções alternativas mais frequentemente manifestadas por estes. Posteriormente, e à medida que avançarmos no trabalho, com a apresentação do conjunto de actividades e estratégias a serem aplicadas em sala de aula, ter-se-á o cuidado de explorar com maior profundidade as dificuldades que os alunos poderão sentir relativamente aos conceitos e fenómenos implícitos em cada uma destas actividades, assim como as concepções, ideias e conhecimentos prévios que estes poderão manifestar. Nesta altura, serão propostas possíveis formas de as ultrapassar, o que implica questionarmo-nos, enquanto professores, de que modo estas ideias prévias deverão ser tidas em atenção ao longo de todo o processo educativo.

É importante acrescentar que toda esta análise, previsão e conjunto de alternativas que o professor já deverá levar para a sala de aula e que poderá pôr em prática sempre que se justificar e que a situação assim o exigir, requerem por parte do docente a realização de todo um trabalho prévio e uma reflexão anterior ao acto educativo propriamente dito, podendo-se mesmo afirmar que muita da acção educativa levada a cabo pelo professor deverá passar pela realização deste trabalho prévio. Quer-se com isso referir que uma aula com uma estrutura tal como as que aqui são apresentadas exige muito mais do docente que as prepara. No entanto, ao sugerir-se a aplicação deste tipo de ensino, não se estará de forma alguma a defender que o professor deva antever até ao mais ínfimo pormenor a aula que irá leccionar. Mas, pelo contrário, defende-se que exista sempre lugar para o imprevisto, para o aparecimento de questões e ideias não previstas anteriormente, que surjam da curiosidade dos alunos, das ideias que estes trazem para a sala de aula que advêm das suas vivências do dia a dia, deixando-se lugar para a imaginação e criatividade.

Por outro lado, à medida que exploramos determinado conceito verificamos que os alunos possuem determinadas ideias e crenças sobre o som que não correspondem completa ou totalmente à realidade. A estas ideias nós chamamos de *Concepções Alternativas*, sendo, no entanto, mais correcto chamá-las de *Preconcepções*. É importante referir que estas surgem

muitas vezes do facto dos alunos chegarem a conclusões incorrectas sobre os conceitos em causa. No entanto, há que acrescentar que estas conclusões se encontram em muito associadas ao próprio decorrer do processo educativo.

Muitos dos modelos mentais que são criados pelos alunos, tais como imagens, regras, analogias e associações têm como finalidade organizar e simplificar um conjunto de conhecimentos adquiridos por estes. Poderão ser apontados alguns dos principais problemas associados aos modelos mentais construídos pelos alunos, nomeadamente o facto de serem possivelmente incompletos, chegando mesmo a serem contraditórios e inconsistentes com o mundo circundante.

Ao estudar em contexto de sala de aula os movimentos ondulatórios, é importante que os alunos compreendam alguns fundamentos teóricos que lhes estão associados. Por sua vez, a estes conteúdos também se encontram frequentemente associadas diversas concepções alternativas. Refira-se, por exemplo, as ideias associadas ao estudo de fenómenos como a sobreposição de ondas, sejam estas sonoras ou não, a forma de propagação destas ondas e, por último, a necessidade em alguns casos da existência de um meio material que suporte esta propagação. Em seguida serão apresentadas algumas destas concepções.

Uma primeira ideia frequentemente presente entre os alunos é de que uma onda, à medida que se propaga no espaço ao longo do tempo, transporta sempre matéria à sua passagem. Talvez esta ideia advenha da observação de que um barco quando colocado à deriva num mar com forte ondulação acaba por se movimentar. Por outro lado, os alunos apontam a evidência de que na praia nós somos arrastados por uma onda que quebra na costa, ou de que o lixo dá à costa devido à forte ondulação em dias de mau tempo. Neste âmbito, é importante que o professor explore a complexidade associada às ondas geradas em líquidos, nomeadamente as ondas superficiais, apresentando exemplos de ondas de compressão como as ondas geradas numa mola ou numa corda.

Uma segunda ideia manifestada pelos alunos é de que o som, enquanto fenómeno ondulatório, é capaz de se propagar no vácuo. Alguns alunos chegam mesmo a pensar que a velocidade de propagação destas ondas é superior no vácuo do que em qualquer outro meio, pois nesta situação nada se opõe à sua passagem. Uma evidência apresentada por estes alunos é o facto de em muitos filmes de ficção científica os astronautas no espaço interplanetário ou num planeta desprovido de atmosfera, comunicarem entre si, apesar de necessitarem de um aparelho para conseguirem respirar. Por outro lado, surge a ideia de que o som é incapaz de se propagar

em outros meios que não o ar, essencialmente em meios sólidos ou líquidos. Outros alunos, apesar de considerarem que tal propagação é possível, afirmam que a velocidade de propagação do som nestes meios toma sempre um valor inferior ao da propagação do som no ar (Caldeira, 1991).

Um aspecto a realçar é o facto de que muitos alunos apresentam concepções associadas à propagação e natureza das ondas que se propagam no mar longe da costa. Uma ideia muito frequente dos alunos é de que estas ondas são geradas no interior do líquido.

Outra das ideias manifestadas é que tanto as ondas sonoras como as luminosas são fenómenos instantâneos. Uma das situações do nosso dia a dia que poderá permitir contornar esta concepção e comparar a ordem de grandeza das velocidades de propagação do som e da radiação electromagnética consiste na exploração do fenómeno da trovoadas. Outras situações poderão também ser exploradas, tais como o fenómeno do eco, ou o estudo do fenómeno das supernovas (para o caso das ondas luminosas).

No que diz respeito ao estudo das grandezas que caracterizam uma onda sonora, os alunos confundem com alguma frequência os conceitos de amplitude sonora com o de frequência. A esta confusão encontra-se muitas vezes associada uma questão de linguagem, na medida em que os alunos, por exemplo, ao referirem-se a um som menos intenso, usam o termo “baixo”, sem associarem esta palavra a um som mais grave.

Outra concepção consiste em considerar que o conjunto de frequências que caracterizam o toque da sirene de uma ambulância é alterado pelo condutor à medida que o veículo se aproxima ou afasta relativamente ao ouvinte. De modo a contornar esta ideia será realizada uma actividade laboratorial que tem como objectivo fundamental o estudo do Efeito Doppler (Caldeira, 1991).

Poderão ser, ainda, dados exemplos de outras concepções associadas ao estudo do som e dos fenómenos ondulatórios, as quais, apesar de se manifestarem com uma menor frequência, poderão estar presentes. Algumas destas ideias são indicadas a seguir:

- O som pode ser produzido sem se recorrer à utilização de um qualquer objecto material;
- O timbre ou nota de um diapasão é alterado quando se diminui o número de vibrações efectuadas por minuto;
- O facto de dedilharmos a corda de uma guitarra com diferentes intensidades vai influenciar o seu timbre;
- Os megafones e os altifalantes são aparelhos capazes de gerar sons;
- O ser humano é capaz de ouvir porque consegue concentrar-se nas fontes emissoras de som;
- Num aparelho telefónico os sons são transportados ao longo do fio condutor e não sob a forma de impulsos eléctricos.

## Capítulo 9

*Formulação, aplicação e resultados  
obtidos em cada uma das actividades  
experimentais realizadas*



*“Se ouço esqueço, se vejo recordo, se faço compreendo”*

De acordo com Richard Feynman, prémio Nobel da Física em 1965, o Homem só consegue realmente compreender algo experimentando. É neste âmbito que cada vez mais se defende que os alunos deverão desenvolver as habilidades necessárias que lhes permitam resolver uma vasta gama de problemas, entendendo os conceitos e os princípios básicos implícitos nos mesmos. Associada à resolução de problemas, encontra-se a utilização em contexto educativo do trabalho experimental, que deverá integrar a realização de um conjunto de observações experimentais, que permitam aos alunos perspectivar a Física como uma experiência agradável e emocionante (Jewett & Serway, 2002).

A Física, enquanto Ciência fundamental, lida com os princípios básicos do Universo. Esta é a base sobre a qual se baseiam outras ciências, tais como a Astronomia, a Geologia e a Química. A beleza da Física reside exactamente na simplicidade das suas teorias fundamentais e na maneira como um número extremamente reduzido de conceitos, equações e suposições básicas, permitem alterar e expandir a nossa visão sobre o mundo (Jewett & Serway, 2002).

### ***9.1- Acerca das actividades experimentais aqui apresentadas e sua implementação na sala de aula***

Antes da exploração da temática do som e do modo de propagação das ondas sonoras torna-se relevante explorar e tentar compreender algumas das ideias que os alunos já possuem sobre este conjunto de fenómenos, nomeadamente sobre o que é o som e de que forma este se propaga em diferentes meios. Muitas serão com certeza as questões com que estes alunos se deparam no seu dia-a-dia relacionadas com os fenómenos ondulatórios e, mais especificamente, com as ondas sonoras, sendo notória a grande curiosidade destes face ao referido tema, e também em alguns casos um certo misticismo. Por sua vez, para nós professores, torna-se extremamente interessante explorar e deslindar algumas destas ideias, que chegam em alguns casos a tornar-se crenças. Assim, antes de mais, dever-se-á ter consciência de que muitas dessas ideias poderão ser verdadeiros obstáculos à aquisição, pelos alunos, de aprendizagens efectivamente significativas. Por outro lado, estas mesmas ideias prévias poderão funcionar como indutoras de novas aprendizagens, desde que se realize uma correcta exploração das mesmas.

Deste modo, cabe ao professor prever estas ideias, através de uma reflexão cuidada sobre possíveis questões que possam ser colocadas pelos alunos e aos alunos. Em segundo lugar, deverão ser pensadas e preparadas actividades e estratégias educativas que permitam mostrar as mais diversas aplicações dos fenómenos ondulatórios, explorar os mesmos, numa tentativa de mostrar o som como algo palpável, visível e possível de observar e estudar. Aos alunos deverá ser dada a oportunidade de manipular, mexer, tocar e observar directamente. Este contacto directo com os materiais mostra-se extremamente importante, principalmente nos níveis de ensino mais elementares, como por exemplo no 8ºano de escolaridade, quando é abordado pela primeira vez este tema na disciplina de Ciências Físico-Químicas, de acordo com as orientações curriculares vigentes.

Assim, na presente dissertação, não nos limitaremos a um estudo meramente teórico dos movimentos ondulatórios nem simplesmente à apresentação de um conjunto de actividades experimentais, algumas das quais meramente demonstrativas de determinado fenómeno, envolvendo a manipulação de diferentes variáveis. Tentaremos ir mais além, na medida em que após um estudo da base científica e de algum modo uma abordagem mais teórica associada à Teoria das Ondas e à Física do Som (Acústica), ir-se-á elaborar, explorar e construir um conjunto de actividades a ser implementadas em contexto de sala de aula e exploradas em conjunto com os alunos.

A realização de cada uma das actividades aqui apresentadas, e de acordo com a metodologia seguida, deverá ter uma duração média de 135 minutos, sendo que a primeira fase corresponde a uma fase pré-laboratorial, à qual se segue a execução de um plano de acção previamente delineado pelos alunos e que lhes permita testar as hipóteses levantadas inicialmente. Numa terceira fase da aula, ir-se-á proceder à discussão e interpretação dos resultados obtidos experimentalmente, levantando-se algumas questões de pós-laboratório, que permitam aos alunos, entre outros objectivos, confrontar os resultados obtidos com as suas hipóteses iniciais.

Finalmente, e num processo em que se torna necessário um trabalho prévio por parte do professor, ir-se-á proceder à implementação destas actividades em contexto de sala de aula, através de um contacto directo com os alunos, o que irá implicar, por um lado, o pensar sobre como proceder à sua implementação, quais as estratégias a utilizar e a colocar em prática, assim como a construção de protocolos adequados. E por último, mas não menos interessante, é



importante tirar conclusões sobre a eficácia da metodologia de ensino aqui proposta e do conjunto de actividades seleccionadas.

É ainda importante referir as dificuldades com que nos deparamos aquando da implementação destas actividades em sala de aula, nomeadamente, na gestão do tempo disponibilizado para cada uma das actividades, na escolha do momento mais oportuno para a sua aplicação, ou mesmo na procura do material necessário para a sua realização, procedendo-se, sempre que necessário, à construção deste material. Outra das dificuldades consistiu no registo das respostas dadas pelos alunos às questões com os quais estes foram confrontando-se, tendo-se optado pela gravação do decorrer da aula, o que permitiu uma análise posterior da aula muito mais cuidada, permitindo mesmo a transcrição integral de algumas das questões, afirmações e hipóteses formuladas pelos alunos.

Um aspecto relevante de descrever, embora de forma bastante sumária, é o modo como as actividades experimentais aqui apresentadas se encontram estruturadas. Em cada uma delas começou-se por apresentar uma introdução à actividade, a qual deverá focar o seu objectivo principal, o tema e conceitos que são tratados na mesma e o contexto problemático em que se insere, de acordo com o qual a actividade é apresentada aos alunos. Esta introdução deverá também conter o nível de ensino ao qual a actividade se destina.

Em seguida, será realizada uma contextualização científica dos conceitos a abordar na actividade procedendo a um estudo mais aprofundado dos mesmos, assim como à dedução das equações que permitem calcular certas grandezas.

Posteriormente, serão apresentados os objectivos propostos para a realização da actividade em causa, tanto os que se encontram directamente relacionados com a mesma, mas também um segundo conjunto de objectivos subjacentes à sua aplicação.

No seguimento desta actividade, apresentam-se os passos principais que constituem o procedimento experimental a ser seguido, assim como alguns cuidados que deverá ter-se em atenção ao longo da mesma.

Aos alunos será fornecido um guião da actividade, no qual serão apresentadas algumas das questões mais relevantes sobre os conteúdos e o tema tratado em cada uma das respectivas actividades, assim como alguns passos fundamentais a serem seguidos aquando da realização das mesmas. Neste guia incluem-se, ainda, algumas questões de pós-laboratório, com o intuito de orientar a futura discussão e interpretação dos resultados obtidos experimentalmente, no âmbito do contexto apresentado inicialmente.

Segue-se uma listagem das principais concepções alternativas que poderão ser manifestadas pelos alunos, no que respeita aos conceitos e fenómenos em estudo. Apresentam-se, também, as questões de pré-laboratório, a ser discutidas e exploradas conjuntamente com os alunos, e algumas previsões sobre possíveis respostas dos alunos a estas mesmas questões.

De acordo com a estrutura prevista, são em seguida apresentados os resultados obtidos pela realização da actividade, que advém de um trabalho prévio a ser realizado pelo professor num período que antecede a aplicação prática da actividade em contexto de sala de aula. Apresentam-se, também, as questões a ser debatidas com os alunos, depois de realizada a actividade, assim como algumas conclusões importantes.

Finalmente, é apresentada uma reflexão sobre o modo como decorreu cada uma das actividades, começando por descrever as condições em que esta foi realizada, analisando as respostas dadas às questões de pré-laboratório, realçando os objectivos atingidos e terminando com a apresentação de sugestões e de eventuais alterações a introduzir à actividade em realizações futuras.

## *Actividade nº 1*

### *A propagação do som*



### ***9.2.1- Introdução à actividade***

Esta actividade apresenta como principal objectivo explorar a impossibilidade do som se conseguir propagar no vácuo, na medida em que as ondas sonoras, enquanto ondas mecânicas, necessitam de um meio que suporte a sua propagação. Na exploração desta temática, os alunos serão confrontados com um problema relacionado com o facto de ser indispensável a existência de atmosfera num planeta para que seja possível, por exemplo, o estabelecimento de comunicações utilizando o som e a produção de ondas sonoras.

A actividade aqui apresentada foi elaborada tendo como público-alvo alunos do oitavo ano de escolaridade, e como tal, é importante ter presente quais os conhecimentos prévios destes alunos relativamente aos conceitos aqui abordados, assim como o nível de aprofundamento destes mesmos conceitos. Desta forma, serão aqui essencialmente trabalhados e explorados o conceito de frequência de uma onda, o de amplitude de um sinal sonoro, não aprofundando o conceito de intensidade sonora, já que isto iria requerer bases matemáticas que os alunos neste nível etário não possuem. É só referido aos alunos que esta grandeza é proporcional ao quadrado da amplitude de uma onda, encontrando-se, por isso, com ela relacionada. Por outro lado, a implementação desta actividade em contexto de sala de aula, irá permitir-nos explorar o conceito geral de onda, distinguindo ondas transversais de ondas longitudinais e ondas mecânicas de ondas electromagnéticas.

Por último, é ainda importante referir que a implementação desta actividade será acompanhada de um protocolo, o qual será fornecido aos alunos, de forma a funcionar como um guião à actividade a realizar (Apêndice 1).

### ***9.2.2- Contextualização científica***

As ondas sonoras são designadas de ondas elásticas, pois é a elasticidade do meio no qual se propaga a onda a responsável pela sustentação da vibração e pela sua propagação. Desta forma, quando as partículas que constituem um fluido ou um sólido são deslocadas da sua posição de equilíbrio, é gerada uma força elástica de restituição, que permite às partículas voltar à sua posição inicial. Esta mesma força que se encontra associada à inércia do sistema faz com que a matéria, a qual não é transportada conjuntamente com a perturbação do meio, permita a transmissão das ondas acústicas. Assim, podemos perceber por que motivo as ondas acústicas

necessitam de um meio de propagação, contrariamente ao que acontece com as ondas electromagnéticas que são capazes de se propagar no vazio.

Nesta actividade é importante que fique claro o facto de, geralmente, as ondas não transportarem matéria à sua passagem. Os alunos poderão pensar o contrário, talvez porque estes ao observarem as ondas superficiais a quebrar na praia, verificam que estas arrastam consigo algas e outros objectos. Um exemplo que poderá ser dado será o de uma gaivota no mar, situada longe da costa, e observar que com a passagem das ondas, esta apenas tem um movimento ascendente e descendente, sem efectuar qualquer tipo de movimento na direcção de propagação da onda.

Quando nos referimos ao ar como meio de propagação, então, neste caso, podemos afirmar que as partículas responsáveis pela propagação da perturbação se movimentam na direcção da propagação do som, sendo este deslocamento das partículas responsável por uma alteração na pressão e na densidade do meio.

No caso de uma corda que recebe um impulso transversal, a deformação avança ao longo da corda como um pulso ondulatório, correspondendo a deformação à modificação da forma da corda em relação à posição de equilíbrio, devendo-se esta à interacção de cada segmento da corda com o segmento adjacente. Pode-se acrescentar que durante a propagação do pulso cada segmento da corda se desloca numa direcção perpendicular à direcção da corda. Estas ondas, nas quais a perturbação é perpendicular à direcção de propagação, denominam-se de *Ondas Transversais*. Por seu turno, as ondas em que a perturbação é paralela à direcção de propagação chamam-se de *Ondas Longitudinais*.

As ondas acústicas quando se propagam em materiais gasosos ou fluidos não viscosos, são exemplos de ondas longitudinais, na medida em que as moléculas do gás ou do fluido, através das quais as ondas se propagam, oscilam para a frente e para trás ao longo da linha de propagação, alternadamente comprimindo e rarefazendo o meio. No caso dos materiais sólidos, podemos observar a ocorrência de vibrações longitudinais, mas também de vibrações transversais.

Como referido, as ondas acústicas em gases e fluidos não viscosos, como pode ser considerado o ar em boa aproximação, são ondas longitudinais, provocando o movimento das partículas segundo a direcção da propagação, em movimentos sucessivos para trás e para adiante. Por sua vez, são estes movimentos, responsáveis pela produção de zonas de

compressão e rarefacção, que produzem diferenças de pressão e, consequentemente, originam forças elásticas de reposição que permitem a propagação das ondas sonoras.

Uma ilustração de uma onda longitudinal pode ser obtida com uma mola, sendo possível visualizar as zonas de compressão e rarefacção responsáveis pela propagação da onda no espaço.

Concluimos, desta forma, que as ondas mecânicas, como o são as ondas sonoras, necessitam da existência de um meio elástico para que se possam propagar. Por sua vez, um meio poderá ser considerado elástico se existirem interacções entre as suas partículas, interacções estas que se opõem a qualquer deformação que se verifique neste meio. Então, facilmente podemos concluir que as forças de interacção entre as partículas são maiores nos sólidos do que no caso dos líquidos e dos gases.

Num meio elástico, acontece que se um objecto oscilar, então este irá forçar as partículas subjacentes e vizinhas a oscilarem também, verificando-se que o meio próximo do objecto é deformado, originando-se forças elásticas que têm como objectivo contrariar esta perturbação.

#### **9.2.2.1- Intensidade de uma onda sonora**

Um conceito importante a discutir com os alunos, durante a execução desta actividade experimental e a exploração dos resultados obtidos na mesma, será o de amplitude de uma onda, sendo aqui importante mais uma vez salientar que neste nível etário não se irá explorar o conceito de intensidade sonora, referindo apenas de forma muito geral o seu significado. No entanto, se a mesma actividade fosse direccionada ao décimo primeiro ano de escolaridade, então, neste caso, já se justificaria uma abordagem mais aprofundada deste conceito.

Será importante, antes de mais, referir que as ondas harmónicas podem ser geradas no ar, por exemplo recorrendo à utilização de um diapasão ou de um altifalante animado de um movimento harmónico simples. Neste caso, a fonte de vibração provoca a oscilação das partículas presentes na vizinhança do aparelho em torno das suas respectivas posições e estas mesmas partículas colidem com as partículas vizinhas e assim sucessivamente, provocando a propagação da onda no ar (Tipler, 1991).

O deslocamento das partículas (relativamente à sua posição de equilíbrio) depende da posição ( $x$ ) ocupada pelas mesmas ao longo da direcção de propagação e do tempo ( $t$ ), do seguinte modo:

$$s(x, t) = s_0 \cdot \text{sen}(kx - \omega t) \quad [26]$$

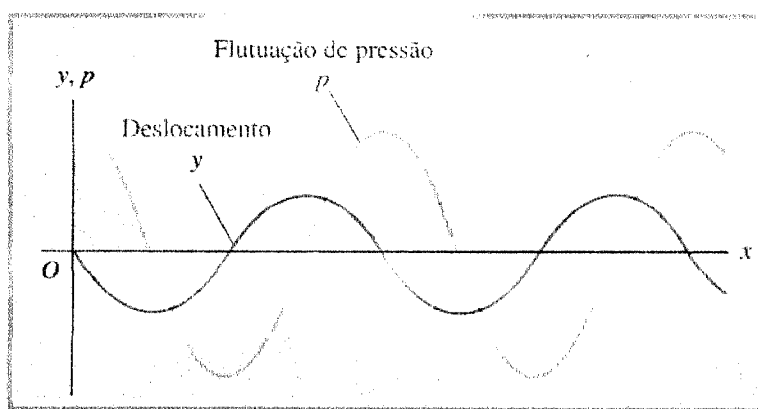
Por seu turno, o deslocamento de pequenas massas de ar na direcção de propagação da onda, provoca uma variação da pressão:

$$p = p_0 \cdot \text{sen}(kx - \omega t - \frac{\pi}{2}) \quad [27]$$

em que  $p$  é a variação de pressão em relação à pressão de equilíbrio e  $p_0$  é o máximo desta variação de pressão. A amplitude da variação de pressão  $p_0$  encontra-se relacionada com a amplitude de deslocamento  $s_0$  do seguinte modo:

$$p_0 = \rho \cdot \omega \cdot v \cdot s_0 \quad [28]$$

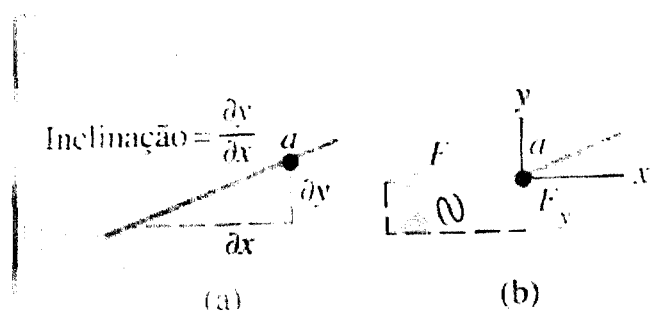
em que  $v$  é a velocidade de propagação e  $\rho$  a densidade média do gás. Desta forma, quando uma onda sonora se propaga no ar, ao longo do tempo, o deslocamento das partículas, a pressão e a densidade de partículas (que é proporcional a esta), variam de um modo sinusoidal com frequência igual à da fonte de vibração. Por outro lado, quanto menor for  $\rho$  menor será a amplitude da onda de pressão (Tipler, 1991).



**Figura 9.13-** Representação da flutuação de pressão  $p(x,t)$  e do deslocamento  $y(x,t)$ , associada à propagação de uma onda sonora sinusoidal progressiva, para um dado instante  $t$ . A diferença de fase entre a flutuação de pressão e o deslocamento é igual a um quarto de ciclo, ou seja,  $p(x,t)$  é máximo quando  $y(x,t)$  é igual a zero e vice-versa (Freedman & Young, 2003).

Na **Figura 9.13** representa-se, para um dado instante, o modo de vibração dos deslocamentos e das flutuações de pressão associadas a uma onda sonora ao longo da sua direcção de propagação. Pode-se observar que as ondas de pressão e de deslocamento apresentam uma diferença de  $90^\circ$  nas respectivas fases, notando-se que quando o deslocamento é nulo, a variação de pressão ou de densidade é máxima ou mínima. Pelo contrário, quando o deslocamento é máximo ou mínimo, as variações de pressão ou de densidade são nulas (Freedman & Young, 2003).

Em seguida, ir-se-á deduzir a equação que permite relacionar a intensidade de uma onda sonora com a amplitude da onda de pressão. Para tal, antes de mais é importante compreender que para se produzir um qualquer movimento ondulatório deverá se aplicar uma força numa determinada zona do meio no qual esta onda se propaga, de tal modo que o ponto sobre o qual a força é exercida move-se, o que implica a realização de trabalho sobre o sistema. À medida que a onda se propaga cada porção do meio exerce uma força, realizando trabalho sobre a porção adjacente, o que implica que a onda transporta energia de uma região do espaço para outra.



**Figura 9.14-** a) Propagação de uma onda numa corda da esquerda para a direita, assinalando-se o ponto  $a$ .  
b) Componentes da força exercida pela parte direita da corda sobre a parte que se encontra à direita deste ponto (Freedman & Young, 2003).

Uma forma eficaz de estudar o transporte de energia associado ao movimento ondulatório consiste no estudo da propagação de uma onda transversal numa corda, estudando de que forma esta energia é transferida de uma porção da corda para outra. Para tal, vamos considerar uma onda a se propagar da esquerda para a direita no sentido positivo do eixo dos  $xx$  ao longo da corda, estudando um ponto  $a$  em particular sobre a corda, designado genericamente por  $a$ - **Figura 9.14**. A corda à esquerda de  $a$  exerce uma força sobre o lado



direito e vice-versa, sendo  $F_y / F$  igual ao valor negativo da inclinação da corda no ponto  $a$ , que também é dada por:

$$\frac{F_y}{F} = -\frac{\partial y(x,t)}{\partial x}, \text{ e logo: } F_y = -F \cdot \frac{\partial y(x,t)}{\partial x} \quad [29]$$

Quando o ponto  $a$  se move ao longo da direcção  $y$ , a força  $F_y$  realiza um trabalho sobre este ponto, transferindo energia para a parte da corda que se encontra à direita do ponto  $a$ . Nestas condições, podemos afirmar que a potência correspondente  $P$  (grandeza que mede a taxa de trabalho realizado no ponto  $a$  por unidade de tempo) é dada pelo produto entre a força transversal  $F_y(x,t)$  no ponto  $a$  e a velocidade transversal nesse mesmo ponto:

$$v_y(x,t) = \frac{\partial y(x,t)}{\partial t}$$

$$P(x,t) = F_y(x,t) \cdot v_y(x,t) = -F \cdot \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} \cdot \frac{\partial y(x,t)}{\partial x} \quad [30]$$

Deste modo, a grandeza potência mede a taxa instantânea de transferência de energia ao longo da corda. Esta depende da posição  $x$  da corda e do tempo  $t$ . É ainda importante salientar que apenas se verifica a transferência de energia nos pontos com uma inclinação diferente de zero ( $\frac{\partial y}{\partial x} \neq 0$ ), pois só nestes é realizado trabalho.

A equação [30] é válida para qualquer onda que se propague numa corda, seja esta sinusoidal, ou não. Se utilizarmos a função de onda para uma onda sinusoidal, então, temos que:

$$y(x,t) = A \cdot \sin(\omega t - kx) \quad [31]$$

$$\begin{cases} \frac{\partial y(x,t)}{\partial x} = -k \cdot A \cdot \cos(\omega t - kx) ; \\ \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} = \omega \cdot A \cdot \cos(\omega t - kx) ; \end{cases}$$

Substituindo em [30] temos que:

$$P(x, t) = -F \cdot [-k \cdot A \cdot \cos(\omega t - kx)] [\omega \cdot A \cdot \cos(\omega t - kx)]$$

$$\text{e logo } P(x, t) = F \cdot k \cdot \omega \cdot A^2 \cdot \cos^2(\omega t - kx)$$

Se utilizarmos as relações  $\omega = v \cdot k$  e  $v^2 = \frac{F}{\mu}$ , em que  $\mu$  corresponde à densidade linear, então, podemos reescrever a relação anterior do seguinte modo:

$$P(x, t) = \sqrt{\mu \cdot F} \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cdot \cos^2(\omega t - kx) \quad [32]$$

Ao analisar o domínio da função  $\cos^2(\omega t - kx)$  verificamos que o seu valor mínimo é de zero, enquanto que o máximo é de 1. Deste modo, a potência instantânea de uma onda, dada pela equação [28], será máxima quando  $\cos^2(\omega t - kx) = 1$ , sendo:

$$P_{\text{máx}} = \sqrt{\mu \cdot F} \cdot \omega^2 \cdot A^2 \quad [33]$$

Por sua vez, a potência média para uma onda sinusoidal numa corda irá corresponder a uma situação em que  $\cos^2 = \frac{1}{2}$ :

$$P_{\text{média}} = \frac{1}{2} \sqrt{\mu \cdot F} \cdot \omega^2 \cdot A^2 \quad [34]$$

de onde podemos concluir que a taxa de transferência de energia é proporcional ao quadrado da amplitude e ao quadrado da frequência (Freedman & Young, 2003).

A equação que permite calcular a potência para uma onda longitudinal pode ser deduzida de modo semelhante, seguindo o mesmo tipo de raciocínio. Este resultado pode ser expresso em termos de potência média por unidade de área da secção recta perpendicular à direcção de propagação da onda, a qual é denominada por intensidade  $I$ . No caso de uma onda sonora a propagar-se no interior de um tubo a intensidade é dada por:

$$I = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\rho \cdot B} \cdot \omega^2 \cdot s_0^2, \text{ sendo que } s_0 = \frac{p_0}{\rho \cdot \omega \cdot v},$$

então:

$$I = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\rho \cdot B} \cdot \omega^2 \cdot \frac{p_0^2}{\rho^2 \cdot \omega^2 \cdot v^2} \text{ ou, equivalentemente, } I = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\rho \cdot B} \cdot \frac{p_0^2}{\rho^2 \cdot v^2} \quad [35]$$

Como é possível observar pela análise da equação acima apresentada, a intensidade de uma onda é proporcional ao quadrado da sua amplitude, sendo esta uma propriedade de qualquer onda harmónica. Por outro lado, a intensidade da onda sonora vai depender de  $\rho$ , a densidade média do gás, o que implica que para uma mesma amplitude de deslocamento  $s_0$ , a intensidade sonora é tanto menor quanto menor for  $\rho$ .

Podemos, também verificar que no caso de uma fonte puntiforme, a intensidade das ondas sonoras produzidas irá decrescer com a distância à fonte sonora. Para comprovar tal afirmação ir-se-á considerar o caso em que uma fonte puntiforme emite uniformemente em todas as direcções (Tipler, 1991). Nesta situação, a energia associada às ondas geradas, quando estas se encontram a uma distância  $r$  da fonte, distribui-se uniformemente sobre uma superfície esférica de raio  $r$  e área  $A = 4 \cdot \pi \cdot r^2$ . Se designarmos por  $P$  a potência da fonte emissora, então, a potência por unidade de área à distância  $r$  da fonte é dada por  $\frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$ . Por sua vez, a potência média por unidade de área perpendicular à direcção de propagação é a intensidade da onda:

$$I = \frac{P_{\text{méd}}}{A} \quad [36]$$

Então, a uma distância  $r$  de uma fonte puntiforme que emite uniformemente em todas as direcções a intensidade é dada por:

$$I = \frac{P_{\text{méd}}}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad [37]$$

Na presente actividade, e tendo em conta o nível de ensino no qual esta será implementada, a intensidade sonora será apenas referida como uma medida da energia média transportada por unidade de tempo e área, uma grandeza proporcional ao quadrado da amplitude da onda sonora. Como mera curiosidade poder-se-á referir que o ouvido humano opera numa vasta gama de intensidades de ondas sonoras, que vão desde aproximadamente  $10^{-12} \text{ W/m}^2$  (que se admite ser o limiar da audição) até cerca de  $1 \text{ W/m}^2$ , valor que corresponde a

um volume de som muito elevado, e que por isso é capaz de provocar uma dolorosa sensação na maioria das pessoas.

**9.2.2.2- Nível de intensidade e sonoridade**

A sensação psicológica de sonoridade (volume de som) varia aproximadamente com o logaritmo da intensidade e não com a própria intensidade. Desta forma, adopta-se uma escala logarítmica para a descrição do nível da intensidade de uma onda sonora, sendo o decibel (dB) a unidade de medida:

$$\beta = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \qquad [38]$$

em que  $I$  corresponde à intensidade do som e  $I_0$  à intensidade num nível de referência, que normalmente é o limiar da audibilidade. Nesta escala, o limiar de audibilidade

$\beta = 10 \cdot \log \frac{I_0}{I_0} = 0 \text{ dB}$  e o limiar da audição dolorosa corresponde a  $I = 1 \text{ W/m}^2$ , sendo

$$\beta = 10 \cdot \log \left( \frac{1}{10^{-12}} \right) = 120 \text{ dB}.$$

**Tabela 9.1- Intensidade e nível de intensidade de alguns ruídos comuns.**

(Tipler, 1991)

Fonte sonora	$I/I_0$	dB	Descrição da sonoridade
Respiração normal	$10^0$	0	Limiar da audibilidade
Biblioteca	$10^4$	40	Muito silencioso
Conversação normal (1 m de distância)	$10^6$	60	Silencioso frequente
Metro	$10^{10}$	100	Uma exposição frequente causa distúrbios na audição
Martelo pneumático	$10^{13}$	130	Limiar de audição dolorosa
Nas vizinhanças da descolagem de um jacto	$10^{15}$	150	Limiar da audição dolorosa
Camião pesado	$10^9$	90	Uma exposição prolongada causa danos na audição
Concerto de rock com amplificadores	$10^{12}$	120	Limiar da audição dolorosa

No que respeita à sensação de sonoridade, é importante aqui referir que esta depende da frequência e da intensidade do som (Tipler, 1991). No entanto, a utilização de uma escala logarítmica para o estudo destes conceitos apenas poderá ser referida aquando da implementação desta actividade no 11º ano, pois no 8º ano de escolaridade os alunos ainda não apresentam as bases matemáticas necessárias. Desta forma, numa abordagem a este nível etário será suficiente ter a noção de amplitude de uma onda sonora, e saber que a intensidade sonora é proporcional ao quadrado da sua amplitude. E por último, fazer a distinção entre estes dois conceitos e o conceito de frequência.

O conceito de amplitude poderá ser facilmente explorado pela análise gráfica do sinal obtido e registado no computador ao longo da execução da actividade em causa. Por sua vez, o conceito de frequência poderá ser estudado pela realização por via computacional de uma análise em frequência do som registado, por exemplo, por um diapasão. A distinção entre estes dois conceitos pode ser evidenciada tocando com diferentes intensidades um diapasão e verificando que a frequência de vibração do mesmo não é alterada, mas somente a sua amplitude.

Com o objectivo primeiro de tentar mostrar experimentalmente a necessidade de um meio de propagação no caso das ondas acústicas, será realizada uma actividade experimental extremamente simples, mas que no entanto nos irá permitir facilmente cumprir os objectivos que nos propusemos atingir.

Em contexto de sala de aula, vários podem ser os contextos problemáticos a ser apresentados aos alunos para a abordagem desta temática. Um possível contexto problemático será:

***Por que motivo se pode enviar uma sonda para Marte, a qual nos irá permitir ouvir um som gerado neste planeta, e pelo contrário, se enviarmos uma sonda para a Lua, não nos será possível ouvir o mínimo ruído?***

Através da actividade experimental aqui apresentada, os alunos deverão no final da mesma ser capazes de responder a esta situação-problema.

### **9.2.3-- Objectivos propostos**

Nesta actividade será importante realizar uma distinção entre dois tipos de objectivos a ser cumpridos, que são respectivamente aqueles que poderão ser cumpridos directamente pela realização da própria actividade experimental, na medida em que esta irá evidenciar, clarificar e esclarecer um determinado leque de conceitos, e por outro lado aqueles objectivos que poderão ser atingidos de forma indirecta, decorrentes da exploração ao longo da actividade de determinados conceitos que se encontram de alguma forma ligados ao tema em estudo, discutindo o significado dos mesmos com os alunos, ou mesmo pela observação da sua relação com os conceitos fundamentais em evidência na actividade.

#### **9.2.3.1- Objectivos a atingir de forma directa pela realização da actividade**

- Demonstrar experimentalmente a necessidade de um meio de suporte para a propagação das ondas sonoras;
- Compreender o significado físico da grandeza frequência de uma onda;
- Compreender que a frequência de uma onda é uma propriedade da mesma, independentemente das características do meio no qual esta se propaga;
- Distinguir os conceitos de frequência e amplitude de uma onda sonora;
- Observar experimentalmente como varia a amplitude da onda de pressão ( $p_0$ ) quando se altera a constituição do meio e mais especificamente, neste caso, quando se altera a percentagem de ar presente no interior da campânula, tornando-se o ar mais rarefeito (ou seja, diminuindo a densidade do meio);
- Observar experimentalmente que uma alteração das características do meio no qual o som se propaga não irá alterar o valor da sua frequência mas apenas a sua amplitude;
- Concluir que o som, ao contrário das ondas electromagnéticas, não é capaz de se propagar no vácuo.

#### **9.2.3.2- Alguns aspectos relacionados com a realização da actividade**

- Compreender o conceito de onda e mais especificamente o conceito de onda mecânica;
- Reconhecer uma onda sonora como uma perturbação na pressão e densidade do meio em questão, a qual cria ao longo da sua propagação zonas de compressão e rarefacção;
- Distinguir ondas transversais de ondas longitudinais;

- Tomar conhecimento que a intensidade sonora é proporcional ao quadrado da amplitude da onda;
- Contornar a concepção alternativa de que uma onda mecânica ao se propagar num meio provoca sempre uma transferência de matéria ao longo da direcção de propagação;
- Contornar a concepção de que os altifalantes são aparelhos capazes de gerar ondas sonoras.

#### ***9.2.4- Material necessário***

- Uma campânula;
- Um computador com programa de aquisição de dados- Cool Edit 2000;
- Um microfone;
- Um altifalante ligado ao computador;
- Bomba de vácuo.

#### ***9.2.5- Procedimento experimental***

No interior de uma campânula será colocado um altifalante, o qual irá reproduzir um som com uma frequência constante no tempo, sendo este gerado pelo computador na aplicação Cool Edit 2000. No interior da mesma campânula será colocado um microfone, também ligado ao sistema de aquisição de dados. Com o microfone ir-se-á registar sucessivamente o som gerado pelo altifalante ao longo do tempo. A actividade será dividida em duas partes, sendo que numa primeira fase e utilizando a bomba de vácuo ir-se-á retirar todo o ar do interior da campânula, analisando-se, através dos registos obtidos no computador, o que acontece à amplitude do sinal recolhido no microfone, assim como à sua frequência. Numa segunda fase e após ser retirado todo o ar presente no sistema será realizado o processo inverso, deixando-se entrar gradualmente o ar no sistema em estudo e observando o que acontece ao sinal recolhido, recorrendo mais uma vez ao registo do som gerado pelo altifalante, utilizando o microfone.

- Relativamente ao programa de aquisição dados utilizado nas actividades realizadas (Cool Edit 2000) é importante referir que uma demonstração do mesmo pode ser obtida fazendo o download grátis na Internet, embora com um tempo utilização limitado. Este programa permite, entre outras opções mais complexas, gerar sons harmónicos com um único valor de

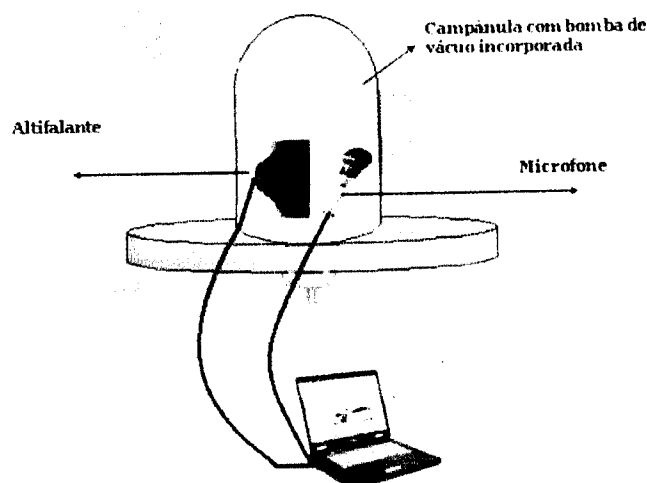
frequência, ou num intervalo de frequências durante o intervalo de tempo estabelecido pelo utilizador. Permite, também, proceder ao registo de sinais sonoros recolhidos com um microfone acoplado a um computador com placa de som, ou ainda fazer a análise em frequência de um som gerado ou captado pelo microfone.

Pela análise dos dados recolhidos experimentalmente será também importante realizar um estudo em frequência do registo sonoro obtido, e para tal bastará utilizar uma das aplicações do Cool Edit 2000, que permite a análise em frequência de um sinal sonoro. Neste âmbito, será relevante que os alunos concluam se ocorreu, ou não, alguma alteração da frequência e amplitude do sinal obtido  $p_0$  à medida que o ar é retirado da campânula.

Esta actividade para além de permitir aos alunos concluir sobre a necessidade da existência de um meio para que o som se possa propagar, será também uma forma eficaz de explorar a distinção entre os conceitos de amplitude de pressão e frequência de uma onda sonora.

No decorrer da actividade e à medida que se for retirando o ar presente no interior da campânula, ir-se-á realizar um registo da pressão lida no manómetro da bomba de vácuo, procedendo de forma idêntica na segunda fase do procedimento em que o ar é restituído à campânula. Pretende-se estudar a relação entre a amplitude de pressão do sinal recolhido e a pressão no interior da campânula, procedendo-se para tal a uma representação gráfica dessa amplitude em função da pressão manométrica no interior da campânula.

### Montagem experimental





### *9.2.6- Alguns cuidados a ter na realização desta actividade*

Deverá ter-se o cuidado de isolar perfeitamente a campânula do exterior, de forma a conseguir fazer o vácuo. Será de prever que na prática não se consiga extrair todo o ar presente no interior da campânula, e consequentemente que a amplitude sonora não tome um valor nulo, mas sim valores muito próximos deste.

Este facto será ainda agravado pela necessidade de se fazerem passar pelos vidros da campânula os fios que permitem a ligação do microfone e do altifalante ao computador portátil, o que irá dificultar o isolamento acústico que se pretende criar. No entanto, saliente-se que o facto de conseguirmos obter experimentalmente valores de amplitude sonora muito próximos do zero já poderá ser bastante positivo, permitindo retirar conclusões bastante satisfatórias. No entanto, deverá ser discutido com os alunos o porquê de não se obter uma amplitude de sinal nula, mas sim próxima deste valor.

### *9.2.7- Concepções alternativas em estudo*

- A velocidade de propagação do som é maior no vazio do que em qualquer outro meio material, pois no vazio nada se opõe à sua passagem;
- O som pode propagar-se no vácuo, mas não em meios sólidos ou líquidos;
- As ondas sonoras são sempre ondas longitudinais, pois o meio oscila na direcção de propagação da onda. Neste âmbito, é importante clarificar a ideia que as ondas sonoras apenas em meios como o ar e em fluidos não viscosos é que são ondas longitudinais. Nos sólidos e fluidos viscosos estas também podem ser transversais;
- As ondas, sejam elas ondas superficiais em líquidos, ou não, provocam sempre o deslocamento de matéria à medida que se propagam no espaço;
- Os altifalantes são aparelhos capazes de gerar sons.

### **9.2.8- Questões pré-laboratoriais**

- 1- Identifica todo o material utilizado para a realização da montagem experimental, indicando a sua função.
- 2- Na montagem experimental efectuada, qual a função do altifalante e do microfone utilizados?
- 3- Com base na exploração do software computacional utilizado na realização desta actividade, responde às seguintes questões:
  - 3.1- Quais as grandezas presentes em cada um dos respectivos eixos do registo gráfico obtido para o som gerado no software Cool Edit e reproduzido pelo altifalante?
  - 3.2- De que depende o som reproduzido pelo altifalante? De que forma(s) o podes alterar?
  - 3.3- De forma a cumprir os objectivos propostos para esta actividade deverá optar-se pela geração de um som complexo ou um som caracterizado por um único valor de frequência? Ou esta escolha será irrelevante?
  - 3.4- Que grandezas se pretendem medir com a utilização de um microfone? Identifica quais as variáveis presentes em cada um dos respectivos eixos do registo gráfico que será efectuado no computador com a aplicação Cool Edit 2000.
- 4- Que factores irão influenciar as características do som registado pelo microfone ao longo da actividade?
- 5- De que forma irá variar a densidade do gás presente no interior da campânula à medida que o ar vai sendo extraído com a bomba de vácuo.
- 6- O que acontecerá ao som emitido pelo altifalante à medida que a quantidade de ar no interior da campânula for diminuindo? Haverá alguma alteração do mesmo? Se sim, prevê qual ou quais. E quando se tiver retirado todo o ar do interior da campânula?
- 8- Que propriedades e características das ondas sonoras estão em estudo nesta actividade?

### ***9.2.9- Reflexão sobre algumas das possíveis hipóteses de resposta dos alunos às questões pré-laboratoriais apresentadas***

Nesta fase será importante o professor reflectir sobre possíveis respostas que poderão surgir face às questões de pré-laboratório aqui colocadas. Na resposta à questão número dois, os alunos poderão manifestar a concepção de que o altifalante é um aparelho capaz de gerar sons. Para tal, e de forma a contornar esta concepção será importante explorar alguns princípios básicos do funcionamento do altifalante, assim como gerar diferentes sons recorrendo ao software Cool Edit, os quais serão posteriormente reproduzidos pelo altifalante. Nesta fase, o professor deverá aproveitar para explorar o conceito de frequência e, para tal, poderá analisar diferentes sons e formas de ondas sonoras, produzidas pelo Cool Edit, podendo-se observar facilmente a forma harmónica de um som caracterizado por um único valor de frequência.

Nesta fase da actividade será importante que os alunos compreendam o esquema de montagem a utilizar, identificando com clareza qual a função do altifalante e do microfone, assim como o motivo pelo qual se escolheu analisar um som constituído por um único valor de frequência, sendo que tal escolha irá permitir com maior facilidade observar se ocorre, ou não, alguma alteração a este som, em termos de frequência, à medida que formos retirando o ar presente no interior da campânula. Assim, torna-se relevante incutir nos alunos a ideia de que a frequência de uma onda é uma grandeza que a permite caracterizar, independentemente do meio no qual esta se propaga.

É ainda importante que antes da realização da actividade fique claro para os alunos quais as grandezas em estudo, sugerindo-se uma análise da variável a ser medida no eixo horizontal do registo sonoro a obter no software Cool Edit na opção de recolha de dados, assim como a medição da amplitude de pressão ( $p_0$ ) no eixo dos  $yy$  à medida que o ar vai sendo retirado do interior da campânula.



**Figura 9.15-** Propagação de uma onda transversal e longitudinal numa mola.

Nesta fase, várias poderão ser as previsões efectuadas pelos alunos sobre o que tem lugar no interior da campânula à medida que o ar vai sendo extraído, podendo estes sugerir que o som captado do microfone não irá sofrer nenhuma alteração nem na sua amplitude nem na sua frequência. No entanto, alguns poderão prever que a amplitude do sinal sonoro registado irá aumentar de forma gradual, apresentando como justificação o facto do meio ir-se tornando cada vez menos denso, o que provoca uma menor oposição à passagem da onda sonora e um consequente aumento da amplitude do sinal registado. Desta forma, ao explorar esta questão em contexto de sala de aula, poderá ser evidenciada uma confusão entre o conceito de velocidade do som e o conceito de amplitude sonora.

Será também de prever que alguns alunos não saibam a distinção entre frequência e amplitude de uma onda sonora, confundindo estes conceitos com alguma regularidade. Uma sugestão de actividade a realizar de forma a contornar esta situação, caso ela tenha lugar em sala de aula, poderá ser recorrendo à análise de um som gerado por um diapasão, quando este é tocado com diferentes intensidades, concluindo que apesar da intensidade sonora registada ser diferente, sendo a intensidade sonora apresentada como uma grandeza proporcional ao quadrado da amplitude, o som gerado pelo diapasão não sofre alterações no valor da sua frequência.

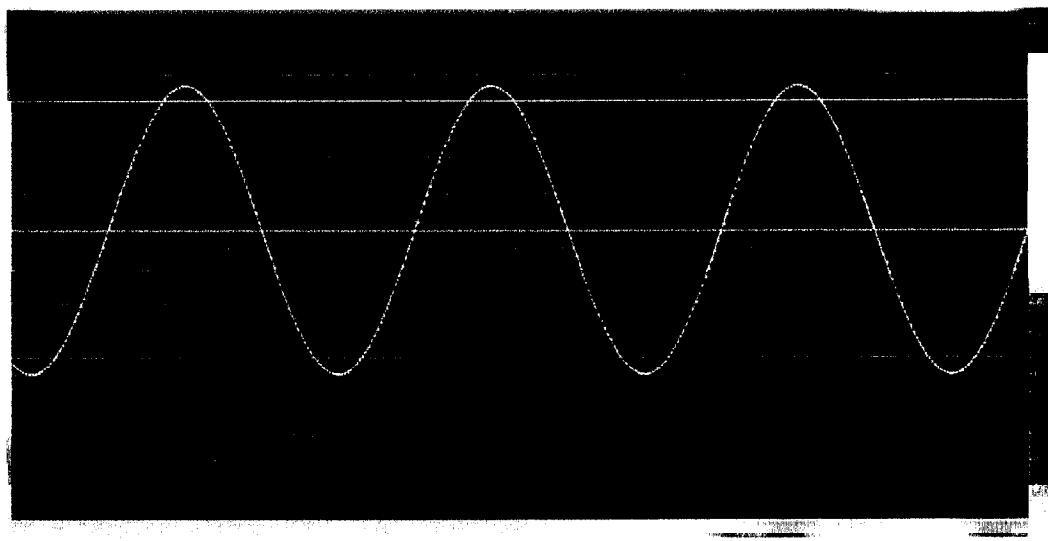
Por último, e antes de qualquer abordagem às ondas sonoras, será importante discutir o conceito de onda mecânica, apresentando-a como uma perturbação do meio, a qual se propaga no caso do ar, segundo ondas longitudinais, e através da criação de zonas de compressão e rarefacção, motivo pelo qual estas ondas são também chamadas de ondas de pressão. Uma actividade simples de realizar, que irá permitir aos alunos facilmente visualizar o fenómeno de propagação das ondas mecânicas consiste em utilizar uma mola, tal como se encontra representado na **Figura 9.15**.

### ***9.2.10- Resultados obtidos experimentalmente***

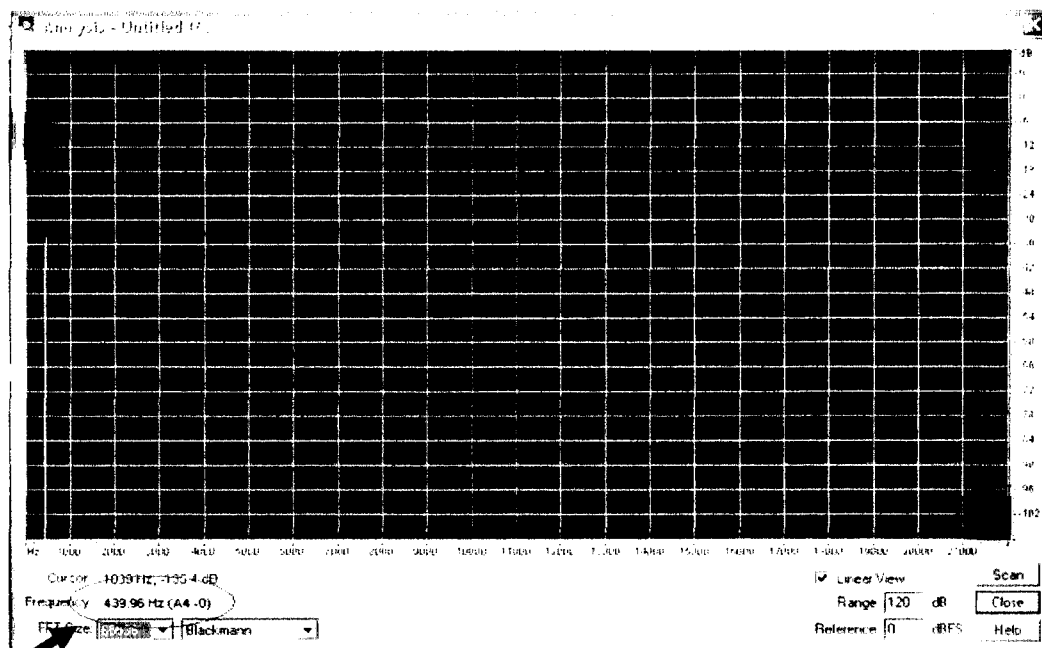
Antes da aplicação de qualquer actividade experimental em sala de aula é importante que o professor teste o procedimento que será por este levado a cabo, assim como a sua eficácia, de modo que se consiga aperceber de possíveis falhas do mesmo, assim como problemas e dificuldades que poderão ter lugar aquando da sua implementação. Este trabalho prévio que deverá ser levado a cabo pelo professor mostra-se bastante enriquecedor, apesar de exigente.

Desta forma, e de modo a poder precaver-se de algumas dificuldades e prever algumas questões, a presente actividade foi testada numa fase anterior à sua aplicação, obtendo-se os resultados abaixo apresentados. A sua realização permitiu-nos, também, reformular algumas questões a colocar na fase de pré-laboratório, prever possíveis questões dos alunos, assim como reflectir sobre outros que possam ser debatidas com estes, após a realização da actividade. Em seguida apresentam-se os resultados obtidos pela aplicação da mesma:

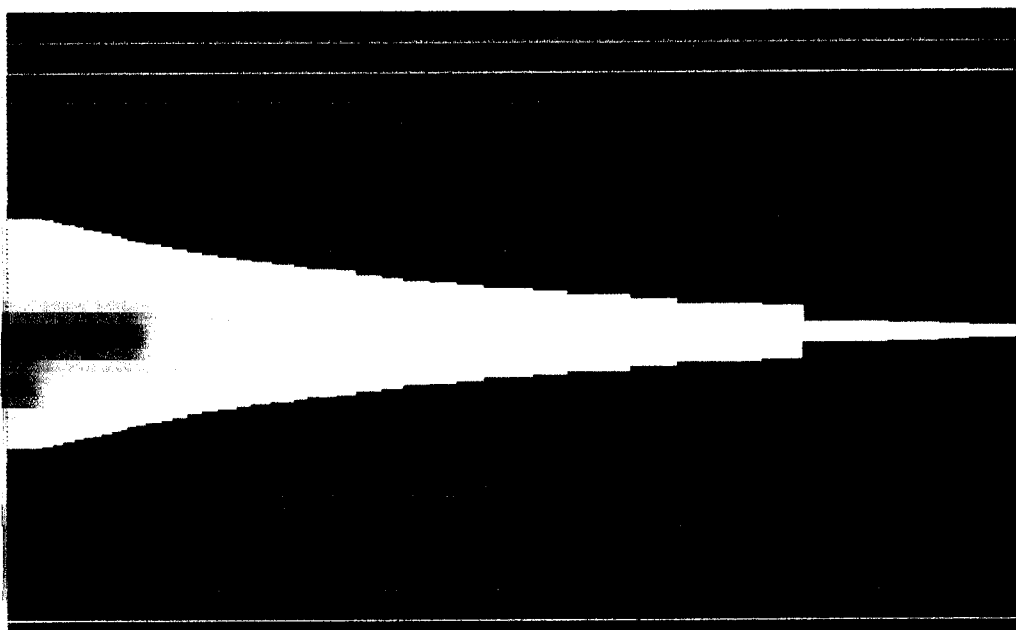
Na **Figura 9.16** apresenta-se o registo sonoro do som produzido pelo computador, optando-se na presente actividade pela geração de um som harmónico simples caracterizado por uma frequência de 440 Hz, o qual corresponde à onda sonora gerada por um diapasão Lá. É ainda importante afirmar que o som foi gerado num intervalo suficiente para que se conseguisse retirar de forma gradual todo o ar presente no interior da campânula, procedendo às respectivas medições.



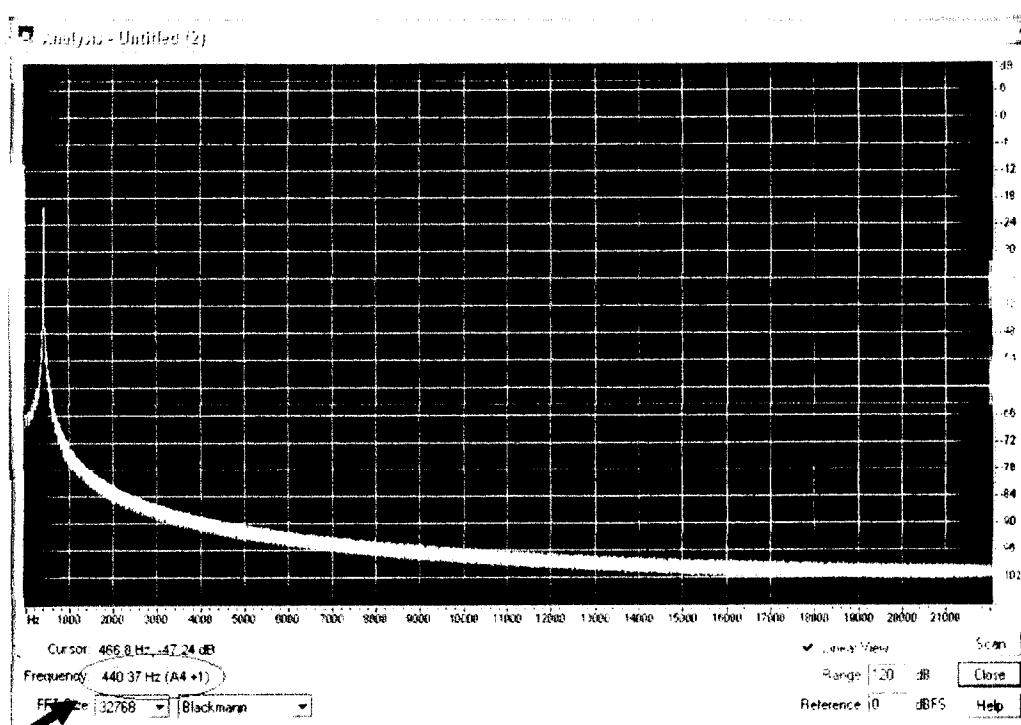
**Figura 9.16-** Registo sonoro da onda gerada no Cool Edit e reproduzida pelo altifalante ao longo do procedimento.



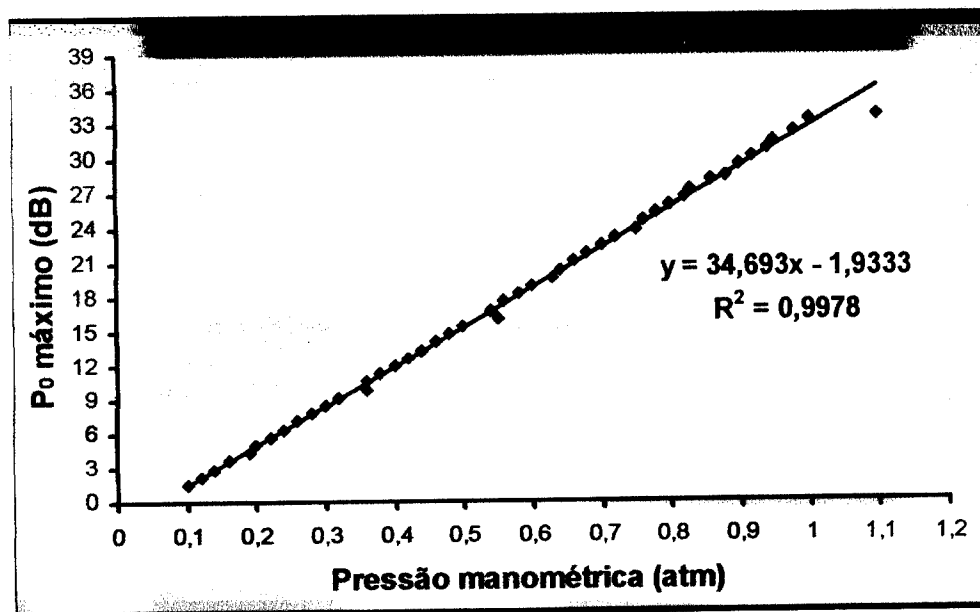
**Figura 9.17-** Análise em frequência da onda sonora gerada com o Cool Edit e reproduzida pelo altifalante.



**Figura 9.18-** Registo sonoro obtido ao longo da primeira fase da actividade à medida que o ar foi sendo retirado da campânula.



**Figura 9.19-** Análise em frequência do som registado com o microfone à medida que o ar vai sendo retirado da campânula.



**Gráfico 9.1-** Representação gráfica da variação da amplitude de pressão medida em função da pressão manométrica presente no interior da campânula.

Tal como previsto inicialmente, a amplitude de pressão da onda sonora gerada vai diminuindo de um modo gradual ao longo do tempo à medida que se vai retirando o ar presente no interior da campânula. Também a pressão manométrica medida no interior da mesma vai diminuindo até atingir um valor muito próximo do zero, o qual corresponde à situação em que o máximo de ar é retirado do interior da campânula. Serão de prever resultados muito similares, embora a variação seja precisamente o inverso, na situação em que o ar é reposto de forma gradual no interior da campânula.

### **9.2.11- Questões pós-laboratoriais**

- 1- Como variou a amplitude do som registado pelo microfone à medida que o ar foi sucessivamente retirado da campânula? Como justifica este facto?
- 2- De que forma a existência, ou não, de ar no interior da campânula influencia o som emitido pelo altifalante?
- 3- Como interpretar os resultados obtidos experimentalmente na situação em que foi retirado o máximo de ar presente no interior da campânula?
- 4- Comparando o som reproduzido pelo altifalante com o som recebido pelo microfone, que podemos afirmar relativamente às frequências que os caracterizam, ao longo de todo o



procedimento realizado? Verificas alguma diferença entre ambos os sons à medida que se altera a quantidade de ar presente no interior da campânula? Justifica.

- 5- Supõe que num determinado intervalo de tempo obtinhas uma amplitude nula do sinal sonoro recolhido pelo microfone. Como interpretarias esse resultado?
- 6- Se em vez de um altifalante se colocasse uma lanterna no interior da campânula e se procedesse de forma idêntica, o que previas que acontecesse? Haveria alguma alteração no brilho da lâmpada?

Neste ponto da actividade, e pela resposta à última questão acima apresentada, é importante discutir com os alunos as principais diferenças entre uma onda electromagnética e uma onda mecânica, nomeadamente a necessidade, ou não, de um meio para que estas se possam propagar. Desta forma, poder-se-á proceder-se à realização da actividade aqui sugerida que envolve a utilização de uma lâmpada ou lanterna.

### ***9.2.12- Algumas conclusões importantes***

Uma conclusão que deverá ficar clara para os alunos após a análise dos resultados obtidos experimentalmente, é o facto do som necessitar de um meio para se poder propagar, pois, tratando-se de uma onda mecânica, a sua propagação deve-se à existência de um meio elástico que a suporte.

Uma segunda conclusão importante será o facto da frequência do som emitido pelo altifalante não ser alterada à medida que se alteram as propriedades do meio.

Finalmente, e em resposta à última questão de pós-laboratório, considera-se importante aqui salientar uma das principais diferenças entre as ondas electromagnéticas e as ondas sonoras que consiste no facto das primeiras não necessitarem de um meio de propagação, facto este que justifica por que motivo a radiação electromagnética é capaz de se propagar no vazio, ao contrário do som.

Como resposta ao problema colocado inicialmente, é importante discutir com os alunos que se a Terra não tivesse atmosfera, poderíamos ver os objectos, mas viveríamos num mundo de silêncio, não nos sendo possível ouvir nenhum som, independentemente da sua frequência, pois não existiria um meio físico que sustentasse a sua propagação. Poder-se-á, pela interpretação dos resultados aqui obtidos, inferir que o facto da Lua não possuir atmosfera

impossibilita a propagação de ondas sonoras neste satélite, facto este que é possível em Marte, pois este planeta possui uma atmosfera, embora muito menos densa do que a existente na Terra.

### **9.2.13- *Análise pós-aula***

#### **9.2.13.1- Caracterização da turma e condições de realização da actividade**

A turma à qual foi aplicada a actividade é constituída por 16 alunos do oitavo ano de escolaridade, sendo que 9 são do sexo masculino e 7 do sexo feminino. As idades dos alunos situam-se entre os 12 e os 13 anos. É também importante referir que nenhum dos alunos é repetente e que estes apresentam um desempenho e aproveitamento escolar na disciplina de Ciências Físico-Químicas situado entre o nível três e cinco. Relativamente à postura manifestada pelos alunos ao longo da realização da actividade, é importante referir que estes revelaram um espírito crítico bastante satisfatório perante as situações com que foram confrontados, demonstrando-se muito participativos, curiosos, questionando os factos e colocando muitas questões sobre os conteúdos abordados ao longo da sessão.

Para a aplicação em sala de aula desta actividade, os alunos foram divididos em quatro grupos de quatro elementos, os quais se encontravam distribuídos por diferentes bancadas de trabalho. No entanto, e tendo em conta que na escola apenas se encontrava disponível uma campânula com uma bomba de vácuo, os alunos tiveram de utilizar todos a mesma montagem experimental. No entanto, o professor optou por analisar a montagem experimental e o material disponível com um grupo de cada vez, de forma a melhor se aperceber das dificuldades sentidas por estes alunos, disponibilizando um espaço para cada grupo poder expor as suas dúvidas e ideias, o que permitiu um debate mais restrito entre o professor e cada um dos grupos.

É importante valorizar a postura manifestada pela turma ao longo da actividade já que a sua realização decorreu em horário extra-lectivo, não tendo os alunos sido avaliados pelo seu desempenho. No entanto, esta postura poderá ser em parte explicada pelo facto destes não estarem a ser avaliados e encontrarem-se perante um professor desconhecido. Conclui-se, pois, que este novo ambiente de ensino-aprendizagem poderá ter funcionado como factor motivador.

Por último, convém referir que os alunos já haviam leccionado os conteúdos relacionados com a temática do som aqui abordados, de acordo com as orientações curriculares do terceiro ciclo para esta disciplina, já que a presente actividade decorreu a meio do terceiro período. Desta forma, estes já haviam explorado os conceitos de frequência, comprimento de

onda, amplitude, a distinção entre ondas longitudinais e transversais, entre outros. Por outro lado, é importante acrescentar que ao longo da realização de toda a actividade os alunos foram colocados à vontade para manipularem o material disponível, colocarem questões ou comentários, sem lhes serem colocadas restrições, tentando acima de tudo criar-se um espírito propício ao processo ensino-aprendizagem.

#### **9.3.13.2- Antes da realização da actividade**

A actividade foi introduzida fazendo referência à importância do estudo da temática do Som, incitando os alunos a darem exemplos de possíveis aplicações do som, obtendo-se as seguintes respostas:

- 1- *“Música”* (Resposta maioritária);
- 2- *“Ouvir rádio”*;
- 3- *“Cantar”*;
- 4- *“Como forma de comunicação”*.

Em seguida, estes foram questionados sobre possíveis fontes geradoras de som, surgindo as seguintes respostas:

- 1- *“Rádio”* e *“Instrumentos musicais”* (Respostas maioritárias);
- 2- *“Altifalante”*;
- 3- *“A voz humana”*.

Com o objectivo de levá-los a concluir que os altifalantes não são capazes de gerar sons, estes foram questionados se este aparelho é capaz de produzir um som na situação em que não se encontra ligado, por exemplo, a um rádio ou um computador.

Em seguida, explorou-se uma das inúmeras aplicações do som, mais concretamente a utilização deste pelos animais, como as baleias e os golfinhos, como forma de comunicação. Aos sons emitidos por estes animais, os alunos chamaram de ultra-sons, definindo-os como *“Um tipo de ondas sonoras”*. Então, o professor colocou as seguintes questões:

- 1- *“O que é uma onda?”*;
- 2- *“O que é uma onda sonora?”*;
- 3- *“Que características permitem distinguir os diferentes tipos de ondas sonoras?”*;

As respostas obtidas à primeira questão foram:

- 1- *“É algo que se propaga no espaço de uma forma ondulatória”* (Resposta dada pela maioria dos alunos);

2- Outros deram o exemplo de uma onda a propagar-se na corda de uma guitarra ou no mar.

Relativamente à questão de pré-laboratório número 3.1 (*“Quais as grandezas presentes em cada um dos respectivos eixos do registo gráfico obtido para o som gerado no software Cool Edit e reproduzido pelo altifalante?”*) obteve-se como resposta maioritária: *“Existem sons mais altos e outros mais baixos”*. Quando foi pedido aos alunos que desenvolvessem esta afirmação, estes justificaram que dois sons podem soar diferente, sendo um mais grave e o outro mais agudo, dando o exemplo das vozes de dois indivíduos caracterizadas por diferentes frequências ou timbres. Um aluno deu, ainda, o exemplo de um mesmo indivíduo que ao falar mais alto ou mais baixo, não altera o timbre da sua voz. Note-se que esta resposta foi dada por um aluno (**aluno 1**) que frequentou durante dois anos o Conservatório de Música, tendo aulas de guitarra, canto e formação musical. Pela sua resposta, podemos identificar uma distinção entre os conceitos de amplitude e frequência, pois no exemplo apresentado é referido que duas pessoas diferentes apresentam timbres de voz diferentes, mas também que uma mesma pessoa poderá alterar a intensidade sonora com que comunica, sem alterar o seu timbre característico.

Começou-se por explorar o conceito de onda, apresentando-se este como um fenómeno que tem lugar devido à existência de uma perturbação em relação a um estado de equilíbrio característico de um sistema, a qual se propaga de uma região do espaço para outra. Esta propagação, por sua vez, pode ser de diferentes tipos, como por exemplo a perturbação da corda de uma guitarra, o canto ou o som que é reproduzido quando colocamos uma régua a vibrar presa por uma das extremidades ao bordo de uma mesa. Nesta fase, pretendeu-se essencialmente levar os alunos a constatar que as ondas sonoras são capazes de se propagar em diferentes meios, apontando-se a existência de diferentes fontes geradoras de som.

Seguiu-se uma discussão sobre se existe, ou não, transporte de matéria à medida que uma onda se propaga num determinado meio. Para tal, deu-se o exemplo de uma bóia no oceano longe da costa. Logo os alunos contrapuseram esta situação com o exemplo de uma onda superficial numa praia que transporta areia à sua passagem, arrastando para a costa objectos que se encontrem à deriva no mar. Aproveitou-se, então, para referir que nos líquidos, as chamadas ondas superficiais, têm um comportamento distinto das ondas geradas quando a profundidade é elevada. A título de exemplo discutiu-se o caso de um barco localizado em alto mar, quando por ele passa uma onda, verificando-se que este apenas apresenta movimentos

ascendentes e descendentes em torno da sua posição de equilíbrio (se o efeito das correntes oceânicas for desprezável).

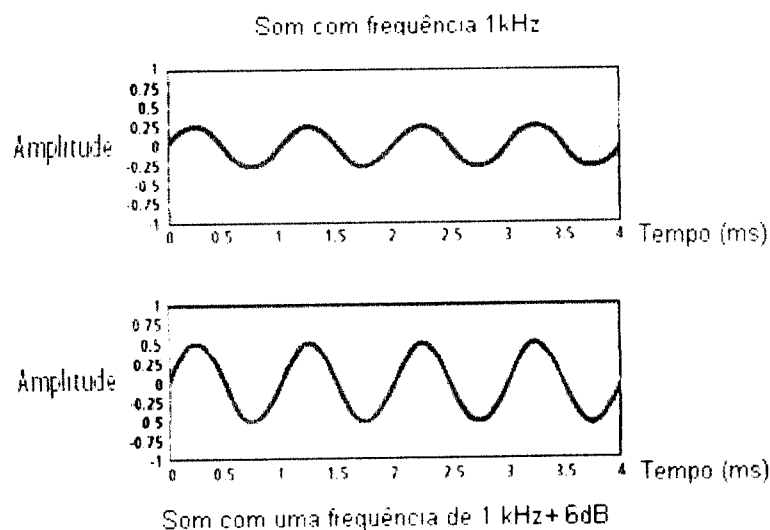
Em seguida, pretendeu-se explorar outro dos conteúdos já leccionados anteriormente no presente ano lectivo que consiste na distinção entre ondas transversais e ondas longitudinais. Neste âmbito, procedeu-se à realização de uma actividade extremamente simples utilizando uma onda-mania. Através da exploração da mesma, os alunos puderam concluir que as ondas sonoras em gases, como por exemplo o ar, são ondas longitudinais, na medida em que estas se devem à geração de zonas de compressão e rarefacção no meio numa direcção coincidente com a direcção de propagação da onda. Os alunos mostraram compreender a actividade realizada na medida em que facilmente associaram as zonas de compressão e rarefacção ao movimento das espiras da onda-mania no tempo, afirmando que:

*“É este movimento para trás e para a frente das partículas no ar que faz com que o som se propague”* (aluno 1). Um aluno deu mesmo um exemplo interessante do modo de locomoção de uma lagarta (o que foi aproveitado para salientar que neste último se verifica o transporte de matéria).

Por último, procedeu-se à discussão dos conceitos de frequência e de amplitude de uma onda sonora. Ao longo deste diálogo salienta-se a resposta de um aluno:

*“ Quando nos referimos à frequência de uma estação de rádio, podemos variar a amplitude deste som mexendo no botão do volume do aparelho, mas, no entanto, se não alterarmos a frequência, ouço sempre a mesma estação.”* (aluno 1). Então, com base neste exemplo e com a apresentação da **Figura 9.20**, procedeu-se à exploração dos conceitos de frequência e de amplitude, levando os alunos a concluir que:

- 1- *“Uma onda pode ser caracterizada pelo seu comprimento de onda, mas, no entanto, a sua amplitude pode variar.”;*
- 2- *“A frequência é o bilhete de identidade de uma onda.”* (aluno 3).



**Figura 9.20-** Representação esquemática de duas ondas sinusoidais caracterizadas pelo mesmo valor de frequência, mas com diferentes amplitudes.

Retirado de: <http://www.gnresound-group.com/lossandcare/encyclopedia/amplitude.htm>.

Após a discussão sobre a forma de propagação de uma onda numa onda-manha, a maioria dos alunos colocou a hipótese de que as ondas sonoras se propagam no ar através do deslocamento das partículas que constituem este fluido num movimento oscilatório, o qual tem lugar na direcção coincidente com a direcção de propagação da onda. Por outro lado, houve também a preocupação de que os alunos compreendessem que este movimento oscilatório das partículas que constituem o meio leva à criação de zonas de maior e menor densidade e pressão que variam no tempo e no espaço, sendo estas responsáveis pela propagação da onda. Para a clarificação deste processo o modelo da onda-manha utilizado mostrou-se uma ferramenta bastante apropriada, já que tal como um aluno afirmou: *“O número de espiras que se podem contar numa determinada secção da onda-manha varia com o tempo e logo o meio é comprimido alternadamente.”* (aluno 2).

### **9.2.13.3- O decorrer da actividade**

Com o objectivo de familiarizar os alunos com o programa de aquisição de dados Cool Edit 2000 procedeu-se à realização de uma primeira actividade introdutória que, de um modo genérico, consistia no registo sonoro de um som gerado por um diapasão, começando por analisar as grandezas a medir em cada um dos eixos.

Antes da realização da actividade os alunos foram questionados sobre a utilidade de um diapasão, ao que o aluno 1 respondeu: *“É um objecto utilizado para afinar as cordas de uma guitarra”* e que *“Cada diapasão emite um som único e puro, correspondente a uma nota musical”*. Posteriormente, colocou-se a seguinte questão: *“Qual a origem do som gerado por um diapasão?”*. Através da resposta a esta questão, pretendia-se que os alunos relacionassem a onda sonora gerada pelo diapasão como sendo o resultado da perturbação de um sistema relativamente a um estado de equilíbrio. Como resposta a esta questão, a maioria dos alunos apontam como fonte geradora da onda sonora a vibração da haste do diapasão com uma frequência constante, o que faz com que este emita *“Um som puro”*, fazendo mesmo a analogia com o movimento oscilatório das partículas numa onda-mania.

Então, os alunos foram confrontados com a seguinte questão: *“Se tocarmos com mais força a haste do diapasão o que acontece ao som gerado por este?”*. As respostas obtidas a esta questão foram:

- 1- *“A nota é a mesma, mas é dada com mais força”*;
- 2- *“O som é mais alto”*;
- 3- *“A frequência do som não é alterada, mas a intensidade da nota é superior” (aluno 1).*

De modo a testar estas hipóteses e permitir uma distinção clara entre os conceitos de intensidade e frequência de uma onda sonora, utilizou-se um diapasão de 440 Hz, (que corresponde ao “Lá” de uma escala musical) e o programa de aquisição de dados Cool Edit, realizando-se diferentes registos do som gerado por este, fazendo variar a força com a qual a haste do diapasão era colocada a vibrar. Nesta situação as respostas obtidas foram as seguintes:

- 1- *“A amplitude da onda registada em y aumenta”*;
- 2- *“O som é mais alto”*;
- 3- *“Os picos obtidos no registo tornam-se cada vez maiores quanto maior a força com que batemos na haste do diapasão”*.

Após explorar algumas potencialidades do programa, nomeadamente o facto deste poder também ser utilizado para gerar sons com as mais diversas frequências, e já que na escola

apenas existia um diapasão, então, os alunos sugeriram que fosse gerado um som no Cool Edit com uma frequência idêntica à de vibração do diapasão e que comparássemos os dois sons quando tocados em simultâneo. Tanto no programa como no diapasão variou-se a intensidade de cada uma das ondas sonoras e após realizar uma análise em frequência das mesmas, os alunos retiraram as respectivas conclusões, obtendo-se como resposta maioritária: “*A frequência do som gerado não varia, mas este som apenas se torna mais alto ou mais baixo*” (aluno 2). Mais uma vez é importante aqui realçar a linguagem muitas vezes utilizada pelos alunos quando se querem referir à intensidade sonora, utilizando as palavras *alto* e *baixo* para sons mais ou menos intensos, e não para sons mais agudos ou graves.

Neste momento da aula os alunos foram confrontados com o contexto problemático em causa. Surgiram algumas respostas curiosas, como:

- 1- “*A massa da Lua é muito menor que a massa de Marte*” (Resposta maioritária);
- 2- “*Porque Marte tem atmosfera e a Lua não e o som não se consegue propagar no vácuo*” (aluno 2).

Neste momento, pareceu-nos relevante confrontar os alunos com uma situação semelhante com o objectivo de dar continuidade à discussão gerada na aula, assim como permitir a exposição das ideias manifestadas pelos alunos:

“*Então e se colocássemos um diapasão a vibrar na Terra, na Lua ou em Marte, haveria alguma diferença no som produzido em cada um dos respectivos planetas?*”

As respostas dadas pelos alunos foram as seguintes:

- 1- “*Nenhuma. A frequência é o que caracteriza uma onda sonora e o diapasão tem um som caracterizado por um único valor de frequência.*” (aluno 1).
- 2- “*A atmosfera da Terra é mais densa do que a de Marte, sustentando melhor o som do diapasão*” (aluno 4);
- 3- “*Sim. Ouvimos melhor na Terra do que na Lua.*”;
- 4- “*O nosso ouvido é mais eficaz na Terra.*”.

Pela análise das últimas duas respostas podemos concluir que a estas se encontra subjacente a ideia de que o som apenas depende da capacidade de audição do ouvido humano, sendo algo inerente ao mesmo, não dependendo das características do meio no qual este se propaga.

- 5- Por último, uma pequena fracção de alunos considerou que não se verificaria nenhuma diferença quer se ouvisse uma música em Marte, na Lua ou na Terra, dando o exemplo



dos filmes em que podemos observar os astronautas a comunicar entre si, na Lua, sem nenhuma dificuldade.

Após um momento de discussão os alunos foram levados a reflectir sobre possíveis diferenças entre os três astros em questão, levantando-se a questão sobre se o facto da atmosfera da Terra ser mais densa do que a de Marte e o facto da Lua não possuir atmosfera poderiam de alguma forma influenciar as características do som captado. Então, foi solicitada a elaboração de um procedimento experimental que lhes permitisse testar as suas hipóteses, utilizando o material disponibilizado para a realização da actividade. Após um momento de pausa em que foi explorado todo o material presente na bancada, grande parte dos alunos sugeriu que colocássemos no interior da campânula o altifalante de modo a verificar o que acontecia ao som reproduzido por este à medida que se retirasse o ar presente na campânula. Não é de mais aqui acrescentar que ao longo da realização da actividade se notou que a utilização do software computacional surgiu como um factor extremamente motivador para os alunos.

No planeamento do procedimento a ser levado a cabo, foram os próprios alunos que sugeriram que de modo a poderem retirar melhores conclusões sobre se a densidade de ar presente na campânula tem, ou não, influência no som registado pelo microfone, deveríamos isolar bem a campânula do exterior, suscitando-se uma certa curiosidade sobre o que aconteceria se se retirasse todo o ar do sistema, levando os alunos a fazer uma analogia com a ausência de atmosfera na Lua. Neste contexto, um aluno chegou mesmo a afirmar que:

*“Podemos fazer de conta que no início da actividade a quantidade de ar presente na campânula corresponde à atmosfera terrestre e vemos o que acontece ao registo obtido com o microfone, e depois numa posição intermédia em que se retira algum ar da campânula vemos se aconteceu, ou não, alguma alteração ao som registado no computador, como se estivéssemos a estudar um som gerado em Marte. Por último, se conseguirmos retirar todo o ar da campânula fazíamos de conta que estávamos a ouvir um som na Lua.” (aluno 1).*

Neste âmbito, um aluno levantou a hipótese *“Será que o microfone consegue detectar alguma diferença?”*. Como se este fenómeno fosse tão complexo e ocorresse a uma escala a nível microscópico, de tal forma que apesar deste ter lugar, nós é que não somos capazes de o observar.

Na exploração da questão de pré-laboratório número 3.2 (*“De que depende o som reproduzido pelo altifalante? De que formas o podes alterar?”*) obtiveram-se as seguintes respostas:

- 1- *“Este som depende da intensidade sonora e da frequência do sinal que pretendemos”*  
(aluno 1);
- 2- Outros defenderam que este som depende do volume sonoro, ou seja, da intensidade sonora.

Pela resposta à questão de pré-laboratório (*De forma a cumprir os objectivos propostos para esta actividade deverá optar-se pela geração de um som complexo ou um som caracterizado por um único valor de frequência? Ou esta escolha será irrelevante?*) os alunos concluíram que a utilização de um som com um único valor de frequência iria tornar mais fácil a sua análise, possibilitando uma resposta sobre se ocorre, ou não, alteração da frequência. No entanto, alguns consideram que é irrelevante (aqueles que colocaram como hipótese que não se verificaria nenhuma diferença no som registado pelo microfone), não se questionando se poderia, ou não, ocorrer alguma modificação na frequência do som à medida que o ar fosse sendo retirado da campânula. Por seu turno, os alunos quando foram questionados sobre o que teria lugar no interior da campânula à medida que o ar fosse sendo extraído, colocaram as seguintes hipóteses:

- 1- *“O som captado pelo microfone não sofre nenhuma alteração”* (Resposta dada pelos mesmos alunos que afirmaram que era irrelevante utilizar um som caracterizado por um conjunto de frequências ou por uma só frequência);
- 2- *“O som torna-se cada vez mais baixo”* (Resposta maioritária, dada essencialmente por aqueles alunos que sugeriram a utilização de um som com um único valor de frequência);
- 3- *“Ouve-se menos”*; Como se as características de um sinal sonoro dependessem apenas da capacidade que o ouvido humano tem, ou não, de captar este mesmo som;
- 4- *“A intensidade do som é mais baixa”* (Resposta dada pelo aluno 2);
- 5- *“O som que chega ao microfone é mais intenso porque existem menos moléculas a oporem-se à sua propagação”*.

A última resposta aqui apresentada é extremamente curiosa pois demonstra uma certa confusão entre os conceitos de velocidade de propagação de uma onda sonora e amplitude do sinal. Esta hipótese foi contraposta por um aluno que afirmou: *“O som pode se propagar mais*

*rapidamente, mas ser menos intenso” (aluno 1).* Neste momento, fez-se referência à actividade do diapasão, na qual se verificou que embora este tivesse sido tocado com diferentes intensidades a frequência do som gerado por este instrumento era sempre a mesma. Neste momento da aula, e pela análise desta resposta, podemos concluir que alguns alunos ainda continuam com a ideia que a velocidade do som é maior quanto menos denso for o meio, existindo uma menor oposição à sua passagem.

Por último, os alunos levantaram hipóteses sobre o que tem lugar quando todo o ar é retirado do interior da campânula, surgindo como hipótese maioritária, essencialmente pelos mesmos alunos que sugeriram que o som se torna cada vez mais baixo, que se iria registar uma amplitude de sinal nula ou um sinal sonoro muito fraco. No entanto, e em relação aos restantes alunos, notou-se que estes se manifestaram um pouco renitentes sobre a veracidade desta hipótese.

#### **9.2.13.4- Reflexão crítica aos resultados obtidos**

Através de uma reflexão às respostas dadas pelos alunos às questões colocadas, foi possível retirar algumas conclusões importantes. Antes de mais, é preciso salientar que o clima de questionamento gerado ao longo da aula foi propício à explicitação de um conjunto de hipóteses e à exploração das formas de pensar dos alunos.

No que respeita ao conceito de onda, os alunos manifestaram a ideia de que as ondas se propagam no espaço sob a forma de sinusóides com uma amplitude constante e invariável no tempo, não referindo nunca o fenómeno de atenuação em função da distância à fonte sonora. Neste contexto, será importante mostrar-lhes que se tal fenómeno não tivesse lugar, então, independentemente da localização de um aluno na sala de aula, estes ouviriam o professor perfeitamente, não tendo o professor de falar com uma maior intensidade sonora, quando se dirige aos alunos localizados nas últimas filas.

Outro dos aspectos a salientar será que muitas vezes a linguagem utilizada pelos alunos deverá ser alvo de atenção, devendo em muitos dos casos ser devidamente descodificada. E isto porque frequentemente os alunos, apesar de compreenderem determinado conceito, nem sempre utilizam o termo correcto. Neste âmbito, terá de se dar o exemplo da confusão que por vezes parece evidente entre os conceitos de frequência e de amplitude de uma onda. Note-se que muitas vezes fizeram referência a “*Um som mais alto*” quando se queriam referir a uma onda sonora mais intensa e com uma amplitude superior.

Relativamente à aplicação da actividade do diapasão saliente-se a participação do aluno designado por aluno 1, o qual conseguiu de forma extremamente positiva estabelecer a ponte entre a temática do som e a música, mostrando aos restantes colegas que a Física poderá se relacionar com os mais diversos fenómenos que têm lugar no nosso dia a dia. Este mesmo aluno conseguiu apresentar uma distinção clara entre os conceitos de amplitude e frequência de um som, apontando as características fundamentais de um diapasão, tendo ainda uma participação activa na análise do processo em que se retirou de um modo gradual o ar do interior da campânula, fazendo uma analogia com as características da atmosfera que poderiam, ou não, influenciar a propagação de uma onda sonora em Marte e na Terra, assim como a ausência de atmosfera na Lua.

No que respeita às hipóteses apresentadas pelos alunos como resposta à questão-problema apresentada, saliente-se as afirmações: “*Sim. Ouvimos melhor na Terra do que na Lua*” e “*O nosso ouvido é mais eficaz na Terra*”, as quais levam a concluir que para estes alunos as características de um som dependem da nossa capacidade auditiva e não das características do meio no qual o som se propaga, ou ainda que existe “algo” na Terra que nos torna capazes de ouvir melhor.

Quanto à elaboração do procedimento experimental a ser levado a cabo note-se que foram os mesmos alunos que colocaram a hipótese de que “*A atmosfera da Terra é mais densa do que a de Marte, sustentando melhor o som do diapasão*” que posteriormente sugeriram que deveríamos variar a pressão manométrica no interior da campânula e ainda que se utilizasse um som caracterizado por uma única frequência. Deste modo, é possível concluir que estes alunos fazem claramente a distinção entre os conceitos de frequência e amplitude, pois conseguiram prever que à medida que o ar ia sendo retirado da campânula o som se ia tornando cada vez menos intenso. Logo, para este conjunto de alunos, foram cumpridos os objectivos principais propostos para esta actividade.

Por outro lado, saliente-se a existência de um segundo grupo de alunos para os quais não era tão clara a distinção entre o conceito de frequência e amplitude de uma onda. Estes alunos julgaram irrelevante a utilização de um som caracterizado por um único valor de frequência ou por mais do que uma frequência. Foram, também, estes mesmos alunos que sugeriram que não se verificaria nenhuma diferença caso o som se propagasse na Lua, na Terra ou em Marte.

Pela análise dos resultados obtidos experimentalmente podemos verificar que os alunos que colocaram como hipótese que *“O som se tornava mais baixo”* à medida que se retirava o ar da campânula realmente viram as suas hipóteses confirmadas. No entanto, para o grupo de alunos mais renitentes, poderão ter ficado algumas dúvidas sobre se realmente o som não é capaz de se propagar no vazio. Poderá não ter ficado muito clara a distinção entre os conceitos de frequência e amplitude, ou mesmo se alguma destas grandezas depende, ou não, das características do meio de propagação. Para tal, considera-se de extrema importância a análise em frequência do som captado pelo microfone em diferentes instantes e à medida que o ar vai sendo extraído da campânula, pois a apresentação aos alunos de provas concretas poderá contribuir fortemente para que estes abandonem as suas ideias iniciais.

#### **9.2.13.5- Principais conclusões sobre o decorrer da actividade**

No que respeita ao sucesso na realização desta actividade em contexto de sala de aula, considera-se, antes de mais, que a mesma decorreu de uma forma bastante positiva já que se conseguiu levar os alunos a efectuarem previsões dos resultados a obter, a maioria das quais foram de encontro aos resultados posteriormente obtidos. A formulação destas hipóteses levou-os a pensar sobre as grandezas que permitem caracterizar e distinguir diferentes ondas sonoras, clarificando os conceitos de amplitude e frequência de uma onda. Considera-se que ficou claro para grande parte dos alunos, senão todos, que um som poderá apresentar um mesmo valor de frequência, mas apresentar diferentes intensidades.

Por último, e através da análise dos registos sonoros obtidos experimentalmente, considera-se que se conseguiu apresentar aos alunos provas concretas de que a intensidade do som depende da densidade do meio. Por outro lado, conseguiu-se demonstrar a impossibilidade do som se propagar no vazio, através da utilização da bomba da vácuo, instrumento este que nos permitiu simular uma situação em que a pressão no interior da campânula era muito próxima do zero.

No entanto, e através da análise do debate levado a cabo com os alunos, podemos concluir que estes ainda manifestam alguma dificuldade em compreender a propagação das ondas sonoras como ondas de pressão, nas quais é a oscilação das partículas do meio em torno da sua posição de equilíbrio que permite que o som se propague, gerando-se alternadamente zonas de compressão e rarefacção no meio, o que explica por que motivo o som não se propaga no vácuo.

Outra das dificuldades consistiu em realizar a interpretação gráfica dos resultados obtidos experimentalmente. Tais dificuldades foram mais notórias quando se procedeu ao estudo do **Gráfico 9.1** que relaciona a amplitude de pressão registada pelo microfone em função da pressão manométrica no interior da campânula. Tais dificuldades poderão dever-se, entre outros factores, a possíveis faltas de bases matemáticas dos alunos em questão, nomeadamente no que se refere à interpretação de gráficos.

#### **9.2.13.6- Sugestões para futuras aplicações**

No decorrer da aula, foi possível ao professor ir-se apercebendo de algumas ideias que os alunos manifestavam sobre alguns conceitos relacionados com a actividade em questão. Note-se que não se procedeu a uma exploração detalhada sobre a maioria destes conceitos, pois tal exploração iria para além do âmbito da presente actividade. No entanto, é importante fazer referência a tais observações de modo a prevenir futuras intervenções que abranjam o estudo destes conceitos.

Saliente-se a ideia manifestada pelos alunos de que as ondas sonoras permitem o transporte de matéria à medida que se propagam no meio. Pelas afirmações obtidas pudemos concluir que estes necessitam de ser confrontados com factos e exemplos concretos do seu dia a dia que lhes permitam contrapor esta ideia. Para tal, a utilização do modelo da uma onda-mania poderá ser extremamente útil, colocando-se uma folha de papel entre duas espiras e verificando que ao longo da oscilação das diferentes espiras, e consequente propagação da onda gerada, esta folha apenas tem movimentos oscilatórios em torno da sua posição média de equilíbrio, não acompanhando a propagação da onda.

Também o conceito de velocidade de propagação do som e a sua variação não foi aqui explorado de modo aprofundado, na medida em que este não era um dos objectivos a que nos propusemos inicialmente. No entanto, e ao longo do debate de ideias realizado pudemos apercebermo-nos de que alguns alunos confundiam esta grandeza com o conceito de amplitude, nomeadamente ao referirem que à medida que o ar ia sendo retirado da campânula a onda movimentava-se mais rapidamente, porque se verificava uma menor resistência à propagação do som. A esta ideia parece encontrar-se associada a noção de que a velocidade de propagação do som aumenta à medida que o meio se torna menos denso, porque existe uma menor resistência à passagem da onda através do mesmo. Neste âmbito, é importante que os alunos compreendam que ao transmitirmos mais energia à onda sonora, apenas a tornamos mais

intensa, não se verificando um aumento no valor da sua velocidade de propagação. Por exemplo, podemos detectar um eco quando é produzido um som através de um bater de palmas a uma certa distância de uma parede, mas o intervalo entre o som gerado e o seu eco não é inferior quando a intensidade deste som for superior.

## *Actividade 2*

### *Velocidade de propagação do som no ar*



### ***9.3.1- Introdução à actividade***

Na presente actividade ir-se-á proceder ao estudo da velocidade de propagação de uma onda sonora, neste caso específico no ar, concluindo sobre as variáveis que influenciam esta grandeza. Desta forma, um objectivo desta actividade será a obtenção de um valor experimental para a velocidade de propagação do som no ar, de acordo com as condições experimentais em causa.

Nesta actividade, os alunos serão confrontados com um contexto problemático no qual é feita referência às diferentes velocidades de propagação das ondas sísmicas na crosta terrestre, consoante o meio material em questão. Estes diferentes valores da velocidade de propagação de uma onda nas diferentes camadas da crosta terrestre podem dar-nos informação sobre as características e constituição do meio no qual estas se propagam.

A actividade aqui apresentada destina-se aos alunos do 11ºano de escolaridade, apresentando-se como uma actividade laboratorial obrigatória na componente de Física, de acordo com as orientações curriculares para este nível de escolaridade. Desta forma, e tendo em atenção o público-alvo, deverá ter-se em atenção os conhecimentos prévios deste alunos sobre os conceitos que serão aqui explorados, assim como possíveis concepções alternativas que se encontrem a estes associados.

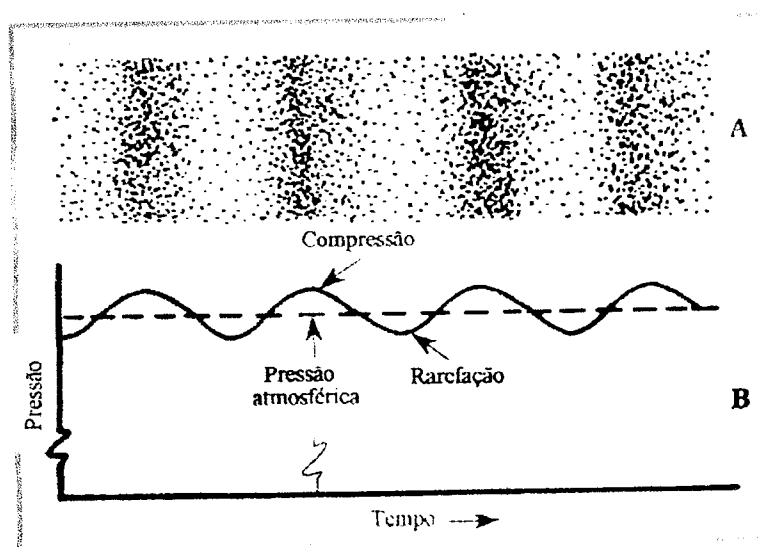
Vários são os conceitos que serão abordados nesta actividade, encontrando-se todos eles associados ao conceito de velocidade de propagação de uma onda sonora, o qual constitui o conceito fundamental em estudo. De entre estes refere-se o conceito de frequência de uma onda, assim como o de amplitude de um sinal sonoro e de intensidade sonora. Depois de se deduzir a expressão geral da velocidade de propagação das ondas sonoras em fluidos mostrar-se-á de que modo, no caso específico do ar (o qual, em condições normais de pressão e temperatura, tem um comportamento muito aproximado ao de um gás perfeito) o valor desta grandeza irá depender da temperatura. Será, ainda, referida a influência da humidade relativa na velocidade de propagação de uma onda sonora. Serão também abordados os processos de atenuação, absorção e reflexão que uma onda sonora pode sofrer ao longo da sua propagação.

Por último, é importante referir que a implementação desta actividade será acompanhada de um guião a ser entregue aos alunos, o qual irá servir de guião para a realização desta actividade (Apêndice II).

### 9.3.2- Contextualização científica

As ondas elásticas propagam-se em qualquer meio material, existindo nos meios sólidos a possibilidade destas se propagarem sobre a forma de ondas longitudinais e transversais. Por sua vez, os fluidos e em particular os gases, não reagem a tensões de corte, e por isso, as ondas elásticas propagam-se sobre a forma de ondas longitudinais de compressão e de rarefacção do meio. Na presente actividade ir-se-á estudar a propagação do som no ar.

Num meio gasoso, é importante salientar que a densidade e a pressão encontram-se directamente relacionadas entre si, de tal forma que as ondas sonoras podem ser descritas como perturbações de densidade ou de pressão- **Figura 9.21**.



**Figura 9.21-** (a) Representação do modo de propagação de uma onda sonora, comprimindo e rarefazendo o meio alternadamente.

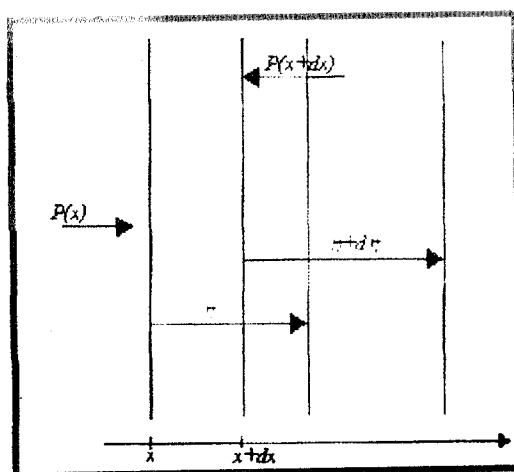
- (b) Representação da respectiva onda sonora como uma onda de pressão, em que as zonas de compressão correspondem a uma pressão ligeiramente superior à pressão atmosférica e as zonas de rarefração a valores de pressão ligeiramente inferiores à pressão atmosférica. (Viana, 2005)

Pode-se observar que nas zonas de compressão a pressão é superior à pressão atmosférica e nas zonas de rarefração é inferior, sendo, no entanto, estas flutuações muito pequenas (Viana, 2005).

No caso em que as ondas sonoras são geradas em meios homogêneos por fontes consideradas pontuais e isotrópicas, estas propagam-se em todas as direcções, formando uma frente de onda esférica. Se admitirmos que o meio de propagação é infinito, então, para grandes

distâncias da fonte sonora podemos considerar que pequenas porções da frente de onda são planas. Nesta fase, ir-se-á focar a atenção sobre o estudo da propagação de ondas planas e monocromáticas num meio gasoso, deduzindo a expressão para a velocidade de propagação, explicitando a sua dependência da temperatura (Viana, 2005)

Para tal, considere-se uma porção de gás no qual se propaga uma onda acústica, concentrando o estudo no movimento de um elemento de massa de espessura  $dx$  e com uma secção unitária. Devido à passagem da onda elástica, as partículas que se encontram num determinado plano deslocam-se para um plano seguinte, o qual designamos de  $\eta$ , enquanto que as partículas que se encontram no plano  $x + dx$  se deslocam para o plano  $\eta + d\eta$ .



**Figura 9.22-** Representação de uma porção de gás no qual se propaga uma onda elástica (Viana, 2005).

Nesta situação, a variação de espessura da camada de gás considerada é dada por:

$$d\eta = \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) dx \quad [39]$$

A variação relativa de volume do elemento considerado é:

$$\delta = \frac{v}{v_0} = \frac{\left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)}{dx} dx = \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad [40]$$

Esta deformação da camada de gás tem origem na diferença de pressão nas superfícies  $x$  e  $x + dx$ , a qual é dada por:

$$P(x) - P(x + dx) \cong P(x) - \left[ P(x) + \frac{\partial P}{\partial x} \cdot dx \right] = - \frac{\partial P}{\partial x} \cdot dx$$

Se considerarmos que a pressão  $P$  num dado ponto é igual à pressão atmosférica,  $P_0$ , com mais uma parcela variável que se deve à propagação da onda acústica, então, a equação toma o seguinte aspecto:

$$P(x) - P(x + dx) \approx - \frac{\partial P}{\partial x} \cdot dx \quad [41]$$

A massa do elemento de gás em estudo é dada por  $dm = \rho_0 \cdot dx$ , sendo  $\rho_0$  a densidade do gás à pressão  $P_0$  e a uma temperatura designada genericamente por  $T$ . Nesta situação, a aceleração desta massa de gás é dada por:

$$a = \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} \quad [42]$$

de onde se conclui que a equação do movimento da porção de gás considerada pode ser escrita do seguinte modo:

$$\rho_0 \cdot dx \cdot \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = - \frac{\partial p}{\partial x} \cdot dx$$

Se admitirmos que a variação de pressão  $P$  é dada pela expressão

$$P = -B \cdot \delta = -B \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

em que  $B$  é o módulo de compressibilidade do meio, então, a equação anterior toma o seguinte aspecto:

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} - \frac{\rho_0}{B} \cdot \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = 0 \quad [43]$$

que é a equação de onda correspondente à velocidade  $v = \sqrt{\frac{B}{\rho_0}}$

Assim, a velocidade de propagação de uma onda sonora num gás depende das propriedades elásticas do meio no qual esta se propaga (através do módulo de compressibilidade) e da densidade deste.

Partindo do princípio que se está a estudar a propagação de uma onda num gás, suposto perfeito, é necessário ter em atenção em que condições esta se processa. Se o processo for isotérmico, então  $p \cdot V = \text{const}$ . Por outro lado, se este for adiabático,  $p \cdot V^\gamma = \text{const}$ , em que  $\gamma$

corresponde à razão entre os calores específicos a pressão constante  $C_p$  e a volume constante  $C_v$  (Viana, 2005; Raichel, 2000).

$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$  (no caso do ar esta grandeza toma o valor de 1,4 pois este meio é constituído essencialmente por moléculas diatómicas).

Sabe-se que para os comprimentos de onda das ondas acústicas, as zonas de máxima compressão e máxima rarefacção se encontram suficientemente afastadas, dificultando a condução térmica entre essas zonas. Desta forma, o sistema em estudo poderá admitir-se como sendo um processo adiabático, o que nos permite escrever:

$$B = \gamma \cdot P_0 \quad [44]$$

e, desta forma, afirmar que a velocidade de propagação do som é dada por:  $v^2 = \frac{\gamma \cdot P_0}{\rho_0}$

Na aproximação de o ar ser um gás perfeito poder-se-á afirmar que a velocidade com a qual a onda se propaga é dada pela seguinte equação:

$$v^2 = \frac{\gamma \cdot n \cdot R \cdot T}{\rho_0 \cdot V} = \frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M} \quad [45]$$

em que  $n$  indica o número de moles de partículas que constituem o meio,  $R$  é a constante universal dos gases perfeitos,  $T$  a temperatura absoluta,  $V$  o volume ocupado pelo gás e  $M$  a massa molar deste. Ao admitir que o ar se comporta como um gás ideal, então, poder-se-á em boa aproximação estimar a velocidade de propagação das ondas sonoras (Freedman & Young, 2003; Barton, 1914).

O valor da massa molar a utilizar para o ar seco deverá ter em consideração a proporção média em que se encontram os diferentes constituintes da mistura; então,  $M$  irá tomar o valor de:

$$M = 2,88 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Em que  $\gamma = 1,4$  e  $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , sendo a velocidade de propagação dada por:

$$v = 20,1 \cdot \sqrt{T} = 20,1 \cdot \sqrt{273 + t} \cong 332 + 0,6t \text{ (m/s)} \quad [46]$$

É ainda importante lembrar que de acordo com a aproximação acima efectuada, o valor da velocidade de propagação do som não depende da densidade do ar, tal como já foi referido na actividade nº1 aqui apresentada (Tipler, 1991).

Podemos com base nesta equação estimar o valor da velocidade de propagação do som no ar seco para diferentes valores de temperatura, sendo que para  $t = 0^\circ \text{C}$  a velocidade do som toma o valor de  $332 \text{ m.s}^{-1}$ . Esta grandeza aumenta de  $0,6 \text{ m.s}^{-1}$  por cada grau de variação na temperatura. Por outro lado, a velocidade do som depende do meio e é maior, por exemplo, no hélio do que no ar (já que a massa molar do ar é superior à do hélio), sendo, geralmente, mais elevada quando o som se transmite através de líquidos ou sólidos. Tal deve-se essencialmente ao facto dos sólidos possuírem uma maior densidade que os líquidos e estes do que os gases (Crowell, 1999).

Em seguida, apresenta-se na **Tabela 9.2** alguns valores para a velocidade de propagação do som em diferentes meios materiais.

Meio de propagação	Temperatura ( $^\circ\text{C}$ )	Velocidade (m/s)
Ar	0	332
Dióxido de Carbono	0	259
Água destilada	25	1498
Água do mar	25	1531
Mercúrio	25	1450
Alumínio	20	5000
Cobre	20	3750
Chumbo	20	1210

**Tabela 9.2-** Velocidade de propagação do som em diferentes meios materiais ( Bello & Caldeira, 2005).

Um outro factor que influencia o valor da velocidade do som no ar é a humidade, ou seja, a percentagem de moléculas de água presente neste.

Se atendermos a que:

$$v = \sqrt{\gamma \cdot \frac{R \cdot T}{M}} \quad [47]$$

é fácil de visualizar a dependência da velocidade na massa molar ( $M$ ) (Raichel, 2000; Viana, 2005).

A razão entre os calores específicos  $\gamma$  pode ser expressa em termos do número de graus de liberdade  $n$  das moléculas, dependendo esta última grandeza da complexidade das moléculas em causa:

$$\gamma = \frac{n+2}{n} \quad [48]$$

Desta forma,  $\gamma$  toma o valor de 1,40 no caso do ar seco, pois as moléculas diatómicas têm cinco graus de liberdade. Esta situação tem lugar na ausência de humidade. Na presença de humidade no ar, a molécula de água é triatómica, pelo que tem seis graus de liberdade. Logo, o grau de liberdade das moléculas é em média de  $5+m$ , em que  $m$  representa a fracção de moléculas de água no ar, sendo:

$$\gamma = \frac{m+7}{m+5} \quad [49]$$

O ar seco é composto em média por 78% de azoto (28g/mol), 21% de oxigénio (32 g/mol) e 1% de Árgon (40 g/mol). Sendo  $m$  a fracção de moléculas de água do total do número de moléculas que compõem o ar, então,  $1-m$  é a fracção correspondente ao conjunto das moléculas diatómicas. Sendo a massa molar da água de 18 g/mol, então, a massa total do ar é de :

$$M_{ar} = (0,78 \times 28 + 0,21 \times 32 + 0,01 \times 40) \times (1-m) + 18 \times m, \text{ ou seja: } M_{ar} = 29 - 11 \times m.$$

Deste modo, o aumento percentual da velocidade de propagação no ar húmido, em relação ao ar seco, é dado por:

$$\Delta v(\%) = \left( \frac{v_{ar}}{v} - 1 \right) \times 100 = \left( \frac{\sqrt{\frac{\gamma_{ar}}{M_{ar}}}}{\frac{\gamma}{M}} - 1 \right) \times 100 \text{ ou } \Delta v(\%) = 455,13 \sqrt{\frac{\gamma_{ar}}{M_{ar}}}.$$

Sobre o impacto da humidade do ar na velocidade de propagação do som neste meio, note-se que esta grandeza sofre um aumento, mas com um desvio reduzido, podendo para o ar completamente saturado a uma temperatura de 0°C ultrapassar os 2% relativamente ao dado pela equação:

$$v \cong 332 + 0,6.t \text{ (m/s)} \quad [50]$$

### **9.3.2.1- Intensidade sonora**

Ao longo do presente trabalho, ir-se-á considerar a situação em que uma fonte sonora isotrópica radia som em campo livre, ou seja, num meio em que são desprezáveis os efeitos de absorção, não existindo obstáculos que possam provocar fenómenos de reflexão, refração ou difracção (Everest, 2001). Neste caso, as frentes de onda das ondas sonoras, numa posição afastada da fonte, poderão ser consideradas como aproximadamente esféricas.

No que respeita à intensidade sonora ( $I$ ), esta grandeza pode ser definida como o valor médio temporal da potência sonora que é transmitida por unidade de área através de uma superfície perpendicular à direcção de propagação da onda (Tipler, 1991).

Se desprezarmos os efeitos da absorção existentes no meio por onde a onda sonora se propaga, então, a energia sonora produzida pela fonte vai se distribuir por superfícies de raios crescentes, concêntricas com a fonte. Desta forma, podemos facilmente concluir que se a distância à fonte duplicar a energia sonora produzida por esta ir-se-á distribuir por uma área quatro vezes superior. Assim, poderá se obter a intensidade sonora de uma onda esférica do seguinte modo:

$$I = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad [51]$$

em que  $r$  é o raio de uma superfície esférica concêntrica com a fonte sonora. Este resultado é conhecido por *Lei do Inverso do Quadrado da Distância* e pode ser traduzida do seguinte modo:

*Num campo livre a intensidade sonora é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre a fonte e o observador*

No entanto, é importante notar que os meios materiais apresentam mecanismos de absorção, pelo que a dependência da intensidade relativamente à distância à fonte se torna mais complexa.

### **9.3.2.2- Absorção de ondas sonoras**

A propagação da energia sonora em meios homogéneos, mesmo na ausência de obstáculos, sofre atenuação devido ao efeito de mecanismos dissipativos, tais como a viscosidade do meio e a condução térmica do mesmo.

Podemos considerar um mecanismo de dissipação de energia associado à viscosidade do meio, o que corresponde, na situação mais simples, a associar a este mecanismo uma força



dissipativa do tipo *Stokes*. Se considerarmos este termo, então a equação de onda toma a seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} - \frac{\rho_0}{B} \cdot \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - \beta \cdot \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad [52]$$

em que  $\beta$  é o coeficiente associado à viscosidade do meio (Viana, 2005).

Se considerarmos soluções do tipo onda plana e monocromática, que se propaga na direcção  $ox$ , então:

$$\eta(x, t) = \eta_0 \cdot e^{i(\omega t - kx)} \quad [53]$$

a qual ao ser substituída na equação [49], permite obter a seguinte expressão:

$$k^2 = \frac{\rho_0}{B} \cdot \omega^2 - i \cdot \omega \cdot \beta \quad [54]$$

Através da análise desta equação podemos verificar que a introdução da dissipação do tipo *Stokes* tem por consequência tornar o valor de  $k$  complexo. Tomando  $k = k' - ik''$ , em que  $k'$  e  $k''$  são reais, a equação [54] pode ser reescrita da seguinte forma:

$$k^2 = k'^2 - k''^2 - 2i \cdot k \cdot k'' = \frac{\rho_0}{B} \cdot \omega^2 - i \cdot \omega \cdot \beta \quad [55]$$

De onde se pode concluir que

$$k'' = \left[ \frac{\rho_0 \cdot \omega^2}{2 \cdot B} \cdot \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{B^2 \cdot \beta^2}{\rho_0^2 \cdot \omega^2}} \right) \right]^{1/2} \quad [56]$$

$$k' = \left[ \frac{\rho_0 \cdot \omega^2}{2 \cdot B} \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{B^2 \cdot \beta^2}{\rho_0^2 \cdot \omega^2}} \right) \right]^{1/2} \quad [57]$$

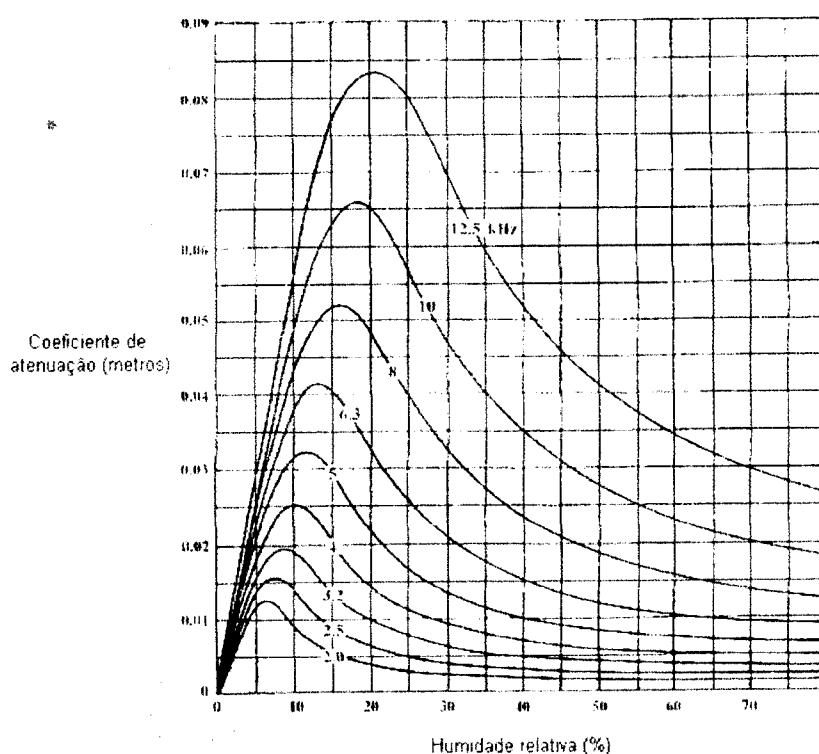
Como resultado, a solução da equação de onda [52] pode escrever-se do seguinte modo:

$$\eta(x, t) = \eta_0 \cdot e^{-k''x} \cdot e^{i(\omega t - k'x)} \quad [58]$$

A amplitude da onda decai com  $e^{-k''x}$ , sendo  $k''$  designado por coeficiente de atenuação (Morse, 1948; Kinsler, 1962 in Viana, 2005).

É importante referir que o processo de atenuação provocado pelo ar ao longo da propagação do som depende das condições de temperatura, humidade relativa e poluição do mesmo. No que respeita ao efeito da humidade nos mecanismos de absorção, verifica-se que

em zonas com uma humidade relativa de 50% a maior atenuação é causada pelas trocas de energia entre as moléculas que compõem o ar e as de vapor de água. Verifica-se, também, que os mecanismos dissipativos devido à humidade do meio são pouco significativos para frequências baixas, porém nas altas frequências a absorção é considerável- **Figura 9.23**. Assim, em locais com uma humidade relativa elevada, à mesma distância da fonte, o nível acústico das componentes a altas frequências é reduzido (Raichel, 2000).



**Figura 9.23-** Representação gráfica da variação do coeficiente de atenuação em função da humidade relativa do meio de propagação. *Retirado de:* <http://html.rincondelvago.com/absorcion-de-ondas-sonoras.html>

### 9.3.2.3- Reflexão e refração de ondas sonoras

Consideremos uma onda elástica que se propaga num meio de densidade  $\rho_1$  e módulo de rigidez  $B_1$ . Esta onda incide normalmente na superfície plana e infinita que separa este primeiro meio de um segundo meio, com densidade  $\rho_2$  e módulo de rigidez  $B_2$ . Mostra-se que se a onda encontra a superfície de separação entre dois meios com características diferentes existe uma onda elástica que se transmite e se propaga no meio 2 e uma outra onda elástica que

regressa ao meio 1. Neste caso, podemos afirmar que ocorreu, respectivamente, um processo de *Refracção* e de *Reflexão*.

As propriedades das ondas reflectidas e refractadas dependem das características elásticas dos meios envolvidos. Desta forma, para caracterizar as propriedades de um meio relativamente à sua elasticidade, é importante fazer referência à grandeza *Impedância Acústica Específica*  $Z$  (Kinsler, 1976).

#### **9.3.2.5.1- Impedância acústica**

Define-se impedância acústica de um meio material como a razão entre a pressão sonora ( $p$ ) e a velocidade duma partícula nesse mesmo meio, isto é,  $Z = \frac{p}{v}$ . Esta é uma característica de cada material e pode também ser calculada como o produto da densidade ( $\rho$ ) pelo valor da velocidade do som nesse meio. As suas unidades de medida são  $Pa.s / m$ .

Esta grandeza encontra-se relacionada com a resistência ou dificuldade do meio à passagem do som. Verifica-se que quando um feixe sonoro atravessa uma interface entre dois meios com a mesma impedância acústica, não ocorre a reflexão da onda, sendo esta totalmente transmitida ao segundo meio. Desta forma, é a impedância acústica entre dois meios que define a proporção da onda que sofre reflexão na interface. Logo, podemos concluir que quanto maior for a diferença de impedância existente entre dois meios, mais intenso será o processo de reflexão.

Note-se que em cada um dos meios a velocidade de propagação da onda é definida como:

$$v_1 = \sqrt{\frac{B_1}{\rho_1}} \quad \text{e} \quad v_2 = \sqrt{\frac{B_2}{\rho_2}}$$

Então, a impedância característica de um meio por onde se propaga uma perturbação sonora pode ser escrita como o produto da velocidade de propagação pela densidade do meio (William, 1894), ou seja:

$$Z = \rho.v \quad [59]$$

Na superfície de separação dos dois meios com diferentes impedâncias acústicas deve se verificar a continuidade da velocidade das partículas e da flutuação de pressão. Estas condições,

ao serem aplicadas a qualquer ponto da superfície de separação dos dois meios, permitem obter as seguintes equações:

$$\frac{\partial \eta_i}{\partial t} + \frac{\partial \eta_r}{\partial t} = \frac{\partial \eta_t}{\partial t} \quad [56] \quad \text{e} \quad p_i + p_r = p_t \quad [60]$$

A pressão acústica das ondas incidente, reflectida e transmitida é dada por:

$$p_i = \rho_1 v_1 \frac{\partial \eta_i}{\partial t} ; \quad p_r = -\rho_1 v_1 \frac{\partial \eta_r}{\partial t} ; \quad p_t = \rho_2 v_2 \frac{\partial \eta_t}{\partial t}$$

Desta forma, a equação [60] pode ser reescrita do seguinte modo:

$$\rho_1 v_1 \frac{\partial \eta_i}{\partial t} - \rho_1 v_1 \frac{\partial \eta_r}{\partial t} = \rho_2 v_2 \frac{\partial \eta_t}{\partial t} \quad \text{e logo} \quad Z_1 \frac{\partial \eta_i}{\partial t} - Z_1 \frac{\partial \eta_r}{\partial t} = Z_2 \frac{\partial \eta_t}{\partial t}$$

Se resolvermos as equações:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \eta_i}{\partial t} + \frac{\partial \eta_r}{\partial t} = \frac{\partial \eta_t}{\partial t} \\ Z_1 \frac{\partial \eta_i}{\partial t} - Z_1 \frac{\partial \eta_r}{\partial t} = Z_2 \frac{\partial \eta_t}{\partial t} \end{array} \right.$$

em ordem a  $\frac{\partial \eta_r}{\partial t}$  e  $\frac{\partial \eta_t}{\partial t}$ , obtemos que:  $\frac{\partial \eta_r}{\partial t} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \frac{\partial \eta_i}{\partial t}$  e  $\frac{\partial \eta_t}{\partial t} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \frac{\partial \eta_i}{\partial t}$

ou, em termos de pressões acústicas:

$$\frac{p_r}{p_i} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad [58] \quad \text{e} \quad \frac{p_t}{p_i} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad [61]$$

Das equações  $\frac{\partial \eta_r}{\partial t} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \frac{\partial \eta_i}{\partial t}$  e  $\frac{p_r}{p_i} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$  podemos concluir que quando  $Z_1 > Z_2$ ,

então,  $\frac{\partial \eta_i}{\partial t}$  e  $\frac{\partial \eta_r}{\partial t}$  estão em fase, enquanto que as pressões acústicas  $p_i$  e  $p_r$  estão em oposição

de fase. Por seu turno, se  $Z_1 < Z_2$ , então,  $\frac{\partial \eta_i}{\partial t}$  e  $\frac{\partial \eta_r}{\partial t}$  estão em oposição de fase enquanto que as pressões acústicas,  $p_i$  e  $p_r$ , se encontram em fase. Em particular, se o segundo meio for rígido ( $Z_2$  infinito) a velocidade das partículas na superfície de separação é nula, o que conduz à duplicação da pressão sonora na fronteira entre os dois meios.

A fracção da intensidade sonora reflectida e transmitida é dada, respectivamente, por:

$$\frac{I_r}{I_i} = \frac{Z_1 \left\langle \frac{\partial \eta_r}{\partial t} \right\rangle^2}{Z_1 \left\langle \frac{\partial \eta_i}{\partial t} \right\rangle^2} = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad [62]$$

$$\frac{I_t}{I_i} = \frac{Z_2 \left\langle \frac{\partial \eta_t}{\partial t} \right\rangle^2}{Z_1 \left\langle \frac{\partial \eta_i}{\partial t} \right\rangle^2} = \frac{Z_2}{Z_1} \left( \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^2 = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad [63]$$

Note-se que no limite em que  $Z_2$  tende para infinito a onda incidente é totalmente reflectida. É ainda importante referir que estes resultados podem ser generalizados para o caso da incidência oblíqua em interfaces planas, sendo que para fontes suficientemente afastadas do obstáculo, e para comprimentos de onda menores que as dimensões do obstáculo, as leis da óptica geométrica constituem uma boa aproximação no tratamento da reflexão e da transmissão de ondas sonoras (Rossing, 2000 *in* Viana, 2005).

Pela análise da expressão  $\frac{p_r}{p_i} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$  podemos verificar que a fracção de energia sonora reflectida por uma superfície depende da impedância dos dois meios em contacto, ou seja, das características geométricas e do tipo de material que reveste a superfície. Desta forma, as paredes planas e os tectos compactos e rígidos são bons reflectores, enquanto que materiais porosos e moles, absorvem bastante a energia acústica que nelas incide.

No caso de um auditório, se este tiver muitas superfícies planas reflectoras será difícil entender o orador em virtude das múltiplas reflexões que irão ocorrer. De modo a evitar este problema, muitas vezes opta-se por revestir estas superfícies com materiais que aumentam a absorção e que consequentemente diminuem o tempo de reverberação.

Tanto o *Eco* como a *Reverberação* são dois fenómenos associados à reflexão das ondas acústicas. O eco é o fenómeno que consiste em escutar o som que é reflectido numa superfície depois de se ter extinguido a sensação produzida pela onda sonora proveniente directamente da fonte. Por sua vez, a reverberação é produzida quando as ondas reflectidas chegam ao ouvinte antes da extinção da onda directa (Raichel, 2000).

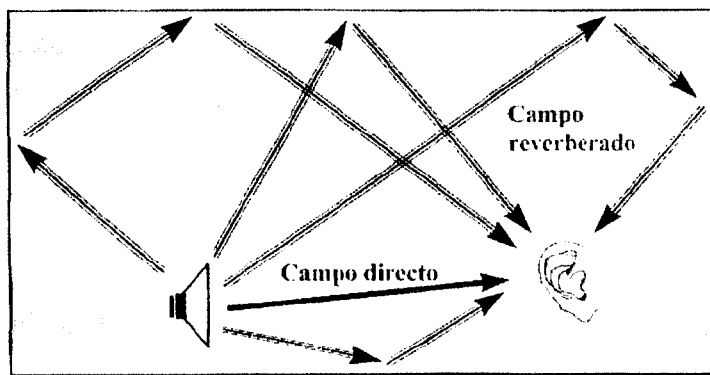
### **9.3.2.5- Processo de reverberação de uma onda sonora**

Se num recinto fechado for accionada uma fonte sonora, as primeiras ondas geradas propagam-se até às paredes, sofrendo reflexão. Estas percorrem um caminho em zigue-zague em todas as direcções. Neste intervalo de tempo, foram emitidas novas ondas, as quais se combinam com as anteriores. Deste modo, as vibrações sonoras aumentam, até alcançarem um valor estacionário. O processo de reverberação tem lugar quando a diferença entre os instantes em que os dois sons são recebidos é inferior a 0,1segundo. Não é entendido um novo som, mas sim a continuação do som inicial (Kinsler, 1976).

O processo de reverberação é um processo acústico complexo, tendo um papel importante, por exemplo, nos instrumentos musicais, gravações de som, na construção de uma sala na qual determinado instrumento será utilizado, tendo uma influência determinante sobre a qualidade geral do som produzido.

É importante referir que tal como é do nosso conhecimento, o som de uma caixa acústica pode “soar” diferente consoante o ambiente em que este é tocado, o material que o constitui e as suas dimensões. Este facto é o resultado directo da influência do tempo de reverberação do ambiente em que o som é produzido.

O tempo de reverberação caracteriza a reverberação de um local, sendo definido como o intervalo de tempo necessário para que se verifique a diminuição da intensidade de uma onda sonora de  $\frac{1}{10^6}$  do seu valor inicial, o que corresponde ao decaimento de 60dB no nível de intensidade sonora (Campbell, 1987 in Viana, 2005).



**Figura 9.24-** Representação esquemática do tempo de reverbação de uma onda sonora.  
*Retirado de:* <http://html.rincondelvago.com/absorcion-de-ondas-sonoras.html>

O tempo de reverbação corresponde ao intervalo entre o instante em que se deixa de produzir o som e o instante em que este deixa de ser perceptível, não devendo este ser muito curto, considerando-se ideal um tempo de reverbação de 1 a 2 segundos. Será, ainda, importante sistematizar com os alunos que a pressão acústica que existe num determinado ponto de um recinto fechado é o resultado de múltiplas reflexões resultantes da pressão do som directo com o som reverberado, tal como se apresenta na **Figura 9.24**. Deste modo, verifica-se que o nível de pressão acústica num ponto deste recinto irá depender da absorção acústica das superfícies que limitam o mesmo (Everest, 2001; Barton, 1914).

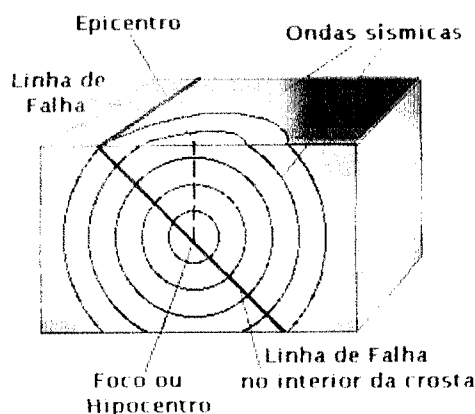
Por último, é importante fazer referência à reflexão em superfícies irregulares, a qual é designada por **Reflexão Difusa**. Neste caso, a dispersão das ondas sonoras é independente do ângulo de incidência, encontrando-se a intensidade da onda sonora uniformemente distribuída em todas as direcções, sendo o som reflectido transformado num som “aveludado” (Kinsler, 2002).

### ***9.3.3- Contexto problemático***

Vários poderão ser os contextos escolhidos pelo professor para a exploração em sala de aula do conceito de velocidade de propagação do som, analisando os factores de que depende esta grandeza física. Na presente dissertação optou-se pela exploração da temática da propagação das ondas sísmicas na crosta terrestre, na medida em que diferentes tipos de ondas sísmicas apresentam diferentes valores para a sua velocidade de propagação. Por outro lado, para um mesmo tipo de onda sísmica, o valor obtido para a velocidade depende das características do meio de propagação. Desta forma, os alunos facilmente poderão compreender

a dependência entre a grandeza velocidade de uma onda e as características do meio no qual esta se propaga.

A análise sismológica de muitos dos sismos que têm lugar no nosso planeta fornece importantes informações que em muito contribuíram para a concepção de um modelo para a estrutura do planeta Terra. Desta forma, o estudo da propagação das ondas sísmicas na crosta terrestre apresenta-se como um contexto extremamente interessante de abordar. Os sismos podem de uma forma genérica ser apresentados como abalos naturais da crosta terrestre que têm lugar num período de tempo extremamente restrito, num determinado local e que se propagam em todas as direcções, tal como se encontra representado na **Figura 9.25**.



**Figura 9.25-** Propagação de uma onda sísmica na crosta terrestre.  
Retirado de: [http://domingos.home.sapo.pt/estruterra\\_2.html](http://domingos.home.sapo.pt/estruterra_2.html).

Esta propagação dos fenómenos sísmicos ocorre sob a forma de ondas, as quais são denominadas de ondas sísmicas (devido à sua origem). A propagação destas ondas poderá ocorrer no interior e à superfície da crosta terrestre, tendo lugar sempre que existir a libertação de energia elástica, ocorrendo um movimento ao longo do plano da falha sísmica. Ao ponto no qual ocorre esta libertação de energia atribui-se a denominação física de *Foco* ou *Hipocentro*. Por sua vez, o ponto que na vertical do hipocentro, se encontra à superfície terrestre designa-se de *Epicentro*.

É importante referir que a energia libertada no foco de um sismo se propaga em todas as direcções do espaço sob a forma de ondas elásticas com uma velocidade característica, designada por velocidade de propagação, segundo a direcção de propagação.

As ondas sísmicas propagam-se através dos corpos, dependendo a sua velocidade de propagação das características físico-químicas do meio material em causa, sendo de salientar a



composição heterogénea da Terra. Estas ondas classificam-se em dois grandes grupos que são, respectivamente, as ondas que se propagam no interior do globo, designadas por **Ondas Profundas** e por outro lado, as ondas que são geradas à chegada das ondas interiores à superfície terrestre, sendo estas designadas por **Ondas Superficiais**.

Quanto às ondas interiores estas podem ser ondas primárias, sendo também denominadas de ondas longitudinais, de compressão ou simplesmente **Ondas P**. Estas ondas correspondem a um movimento vibratório no qual as partículas dos materiais rochosos oscilam para frente e para trás, na mesma direcção de propagação do chamado raio sísmico, alternadamente comprimindo e distendendo o material rochoso. Estas ondas são as mais rápidas e por isso as primeiras a atingir a superfície terrestre, sendo também, por este motivo, designadas de ondas primárias. Estas propagam-se em meios sólidos, líquidos e gasosos, havendo uma variação da sua velocidade quando há a passagem de um meio para outro (Mateus, 2000).

Por sua vez, as ondas transversais, ou simplesmente **Ondas S**, caracterizam-se por causarem vibrações nas partículas numa direcção perpendicular ao raio sísmico, ou seja, as partículas que transmitem as ondas vibram perpendicularmente à direcção de propagação da onda. Estas se propagam com uma velocidade inferior às ondas P, e, conseqüentemente, atingem a superfície terrestre em segundo lugar, sendo por isso, também, designadas de ondas secundárias. É importante referir que as ondas S apenas se propagam em meios sólidos.

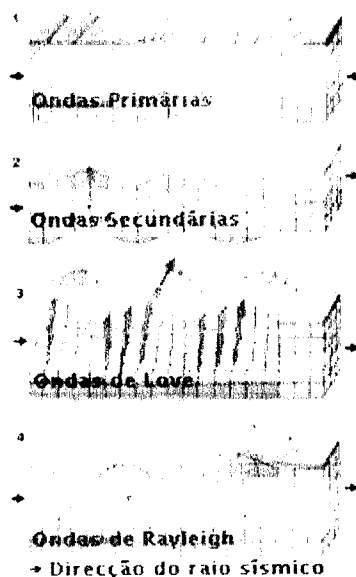
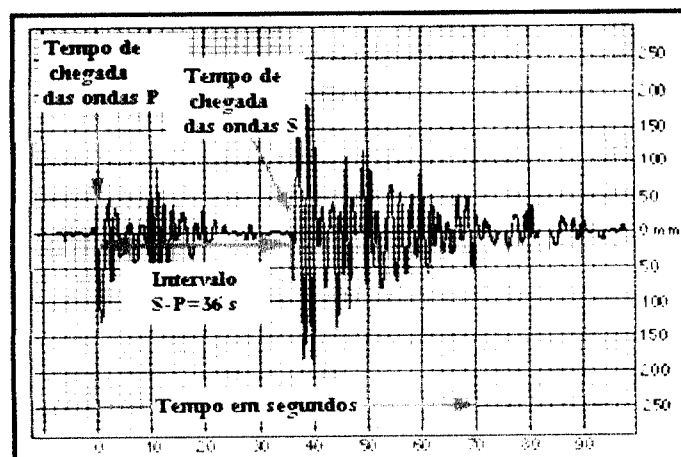


Figura 9.26- Modo de vibração do meio material à passagem dos diferentes tipos de ondas sísmicas.  
Retirado de: [http://domingos.home.sapo.pt/estruterra\\_2.html](http://domingos.home.sapo.pt/estruterra_2.html)

A velocidade de propagação das ondas P e S varia com as propriedades do material rochoso que estas atravessam, nomeadamente com a rigidez e densidade do meio em questão.

Com a chegada das ondas interiores geram-se ondas superficiais, que são em geral as responsáveis pelo grau de destruição provocado pelos sismos de grande intensidade. Estas ondas superficiais podem ser de dois tipos: as ondas Love, também chamadas de **Ondas L**, que são ondas de torção e, por outro lado, as ondas de Rayleigh ou **Ondas R** que se caracterizam por serem ondas circulares, e onde o movimento das partículas tem lugar num plano vertical à direcção de propagação da onda. É, ainda, importante referir que estas ondas superficiais se propagam com uma velocidade inferior à das ondas P e S (Mateus, 2000).

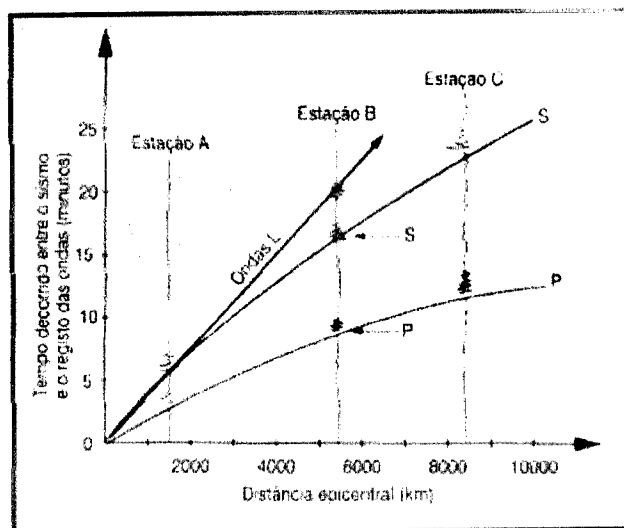
Na **Figura 9.27** apresenta-se um sismograma no qual é registada a chegada das ondas P (as de maior velocidade) e das ondas S, assim como o intervalo de tempo decorrido entre ambas.



**Figura 9.27**- Exemplo de um sismograma. Retirado de: [http://domingos.home.sapo.pt/estruterra\\_2.html](http://domingos.home.sapo.pt/estruterra_2.html)

A partir dos dados obtidos num sismograma é possível proceder ao traçado de um gráfico, tal como o apresentado na **Figura 9.28**, no qual se relaciona o tempo que uma onda sísmica leva a percorrer uma distância localizada entre o epicentro e a estação sismográfica na qual esta é registada.

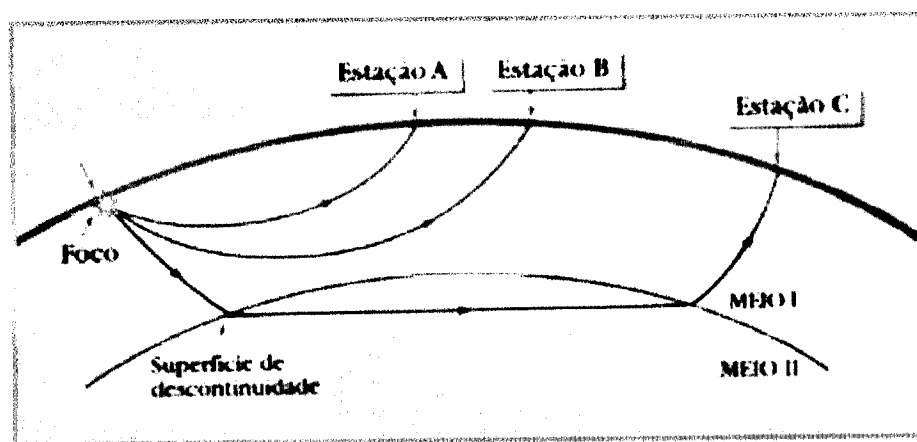
Tal como podemos observar pela análise do gráfico, a velocidade das ondas P e S aumenta com a distância ao epicentro, enquanto que a velocidade das ondas L se mantém constante. Podemos, desta forma, concluir que a velocidade das ondas aumenta com a profundidade, pois quanto maior é a distância epicentral, maior é a profundidade atingida pelas ondas sísmicas.



**Figura 9.28-** Representação gráfica do tempo em que são registados cada um dos tipos de ondas sísmicas em função da distância epicentral.

Retirado de: [http://domingos.home.sapo.pt/estruterra\\_3.html](http://domingos.home.sapo.pt/estruterra_3.html).

Se considerarmos que as estações sismográficas A, B e C se encontram a diferentes distâncias do epicentro de um sismo, tal como é apresentado na **Figura 9.29**, então será de esperar que as ondas sísmicas geradas cheguem primeiro à estação A que é a mais próxima do epicentro, e só depois à estação B e C. No entanto, verifica-se que em alguns casos as ondas chegam primeiro à estação C, podendo este facto ser justificado se admitirmos que estas ondas ao atingirem determinada profundidade, a suficiente para passarem do meio I para o meio II, a sua velocidade de propagação aumenta abruptamente.



**Figura 9.29-** Comparação dos tempos de chegada de diferentes ondas sísmicas a três estações sismológicas situadas a diferentes distâncias do foco do sismo.

Retirado de: [http://domingos.home.sapo.pt/estruterra\\_3.html](http://domingos.home.sapo.pt/estruterra_3.html)

O estudo da velocidade de propagação das ondas S e P no interior da Terra fornece informação sobre as características do meio em que estas se propagam. Refira-se, por exemplo, o facto de a diferença de velocidade de propagação das ondas P nos oceanos e nos continentes permitir considerar a crosta terrestre como encontrando-se subdividida em duas zonas, respectivamente a crosta continental e a crosta oceânica. A variação da velocidade com que as ondas P se propagam ao longo da crosta deve-se à variação da composição do meio, sendo a crosta continental essencialmente constituída por rochas graníticas, com uma densidade relativa de 2,7, enquanto que a crosta oceânica é constituída principalmente por rochas basálticas com uma densidade superior, de cerca de 2,9 (Mateus, 2000).

Do mesmo modo, outros tipos de ondas mecânicas, como as ondas sonoras, sobre as quais centramos a nossa atenção na presente actividade, poderão dar-nos importantes informações sobre as características do meio em que se propagam.

Outro fenómeno que também poderá ser relacionado com a velocidade de propagação do som consiste na exploração dos princípios físicos subjacentes à ocorrência de trovoadas, na medida em que quando assistimos a uma tempestade destas, podemos questionar-nos por que motivo primeiro observamos o relâmpago e só posteriormente ouvimos o trovão, verificando-se um maior ou menor distanciamento temporal entre ambos os acontecimentos, consoante a distância a que nos encontramos desta tempestade.

Neste fenómeno e quando têm lugar as descargas nuvem-Terra do raio, ocorre a formação de um canal de ar ionizado, tornando-se o ar um bom condutor eléctrico, conduzindo uma corrente eléctrica entre a nuvem e o solo terrestre. Este fenómeno, leva a um aumento extremamente rápido da temperatura deste canal, o que provoca uma expansão demasiado rápida do ar, à qual se atribuiu a denominação de *trovão*. No canal através do qual ocorre a passagem de corrente eléctrica ocorre a produção de som em instantes de tempo muito próximos, sendo alcançado primeiramente o som mais próximo que corresponde à zona situada à saída do canal. No entanto, todo o som produzido no canal é captado pelo ouvido humano, num instante posterior (Jewett & Serway, 2002).

Experiências simples, com recurso a materiais do dia a dia, permitem-nos determinar experimentalmente um valor para a velocidade do som no ar. Em seguida será apresentada uma possível actividade sobre este tema, a qual será implementada e explorada em contexto de sala de aula.

### **9.3.4- Objectivos propostos**

#### **9.3.4.1- Objectivos a atingir pela realização da presente actividade**

- Determinar experimentalmente um valor para a velocidade de propagação do som no ar;
- Inferir sobre a influência, ou não, do comprimento da mangueira utilizada para a realização da actividade em causa no valor da velocidade de propagação das ondas sonoras ao longo desta, ou no erro experimental associado;
- Contornar a concepção alternativa de que a velocidade de propagação das ondas sonoras depende da sua frequência, tomando valores superiores para sons mais agudos, e portanto, caracterizados por uma frequência superior;
- Concluir que a velocidade de propagação do som é independente da forma da onda sonora ou da sua frequência;
- Inferir sobre possíveis fontes de erro associadas ao valor calculado para a velocidade do som, através da comparação do valor obtido experimentalmente para esta grandeza com o valor tabelado para a propagação do som no ar à respectiva temperatura.

#### **9.3.4.2- Alguns aspectos relacionados com a realização da actividade**

Na presente actividade, será importante que os alunos sejam alertados para determinados aspectos que possam surgir ao longo da sua realização, ou, ainda, estimulados a realizarem determinadas interpretações a partir dos resultados obtidos ou por observação directa do procedimento levado a cabo, na medida em que a sua compreensão poderá contribuir para um maior conhecimento dos alunos no contexto de “Ondas e Som”. Destes destacam-se os seguintes:

- Tomar conhecimento de que a velocidade de propagação do som no ar é tanto maior quanto mais elevada for a temperatura;
- Tomar conhecimento que tal como o som, também a luz não é um fenómeno instantâneo, no entanto, temos esta ideia dada a sua elevada velocidade de propagação.
- Compreender os princípios básicos associados aos processos de reflexão, absorção e atenuação das ondas sonoras, os quais têm lugar no interior da mangueira;

- Tomar conhecimento de que a absorção de ondas sonoras por um meio é normalmente função da frequência;
- Concluir sobre possíveis alterações ao procedimento aqui seguido, de forma a otimizar os resultados obtidos, indicando possíveis fontes de erro associadas às medições realizadas.

### ***9.3.5- Material necessário***

- Duas mangueiras com diâmetros idênticos, mas com comprimentos distintos. Na presente actividade utilizaram-se mangueiras com um comprimento de 15,5 m e de 18,5 m;
- Um microfone;
- Um computador com sistema de aquisição de dados (Cool Edit 2000);
- Diferentes objectos capazes de gerar sons com diferentes características, tais como, duas estacas de madeira, duas estacas metálicas, dois lápis, entre outros.

### ***9.3.6- Procedimento experimental***

Gerou-se um impulso sonoro extremamente curto e intenso como um bater de palmas ou o tocar de duas estacas metálicas ou de madeira, numa das extremidades da mangueira. A mangueira irá ser percorrida pela onda sonora, tendo um funil na extremidade em que se produz o som, de forma a melhor captar o sinal sonoro. A utilização duma mangueira torna-se extremamente vantajosa, na medida em que reduz a atenuação do som ao longo do espaço percorrido por este.

Posteriormente, e após o som se ter propagado ao longo da mangueira, este irá sair pela outra extremidade, sendo registado pelo microfone. Desta forma, é apenas necessário um microfone para o registo dos dois sons, o que contribui para a minimização dos erros associados à utilização de dois microfones. É ainda importante salientar que o microfone deverá situar-se na proximidade das duas extremidades da mangueira.

Os sons, tanto o gerado, como o posteriormente captado à saída da mangueira, serão registados no computador utilizando o software Cool Edit 2000, com uma taxa de recolha de 44100 amostras por segundo. Sabendo o comprimento da mangueira e o tempo decorrido desde

a geração do impulso até à chegada deste ao microfone situado à saída da mangueira, poder-se-á estimar um valor para a velocidade de propagação do som neste meio.

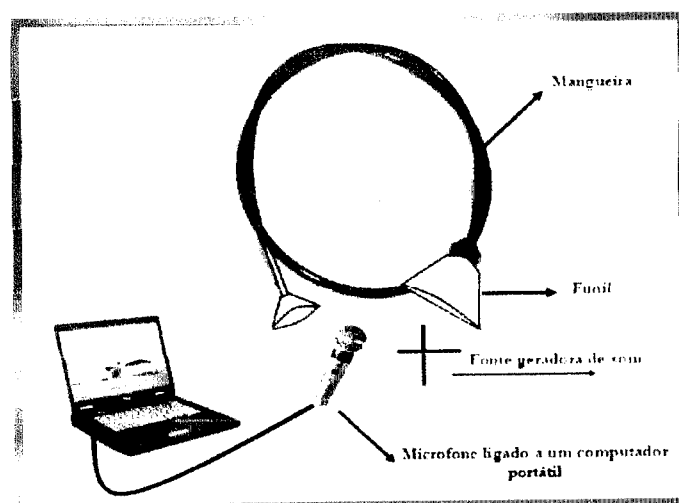
O facto de calcularmos a velocidade de propagação para sons produzidos por diferentes fontes e com diferentes características será importante na medida em que nos permitirá concluir sobre se a velocidade de uma onda sonora depende, ou não, do conjunto de frequências que a permitem caracterizar. Ir-se-á, também calcular, para sons gerados pela mesma fonte sonora mas com diferentes intensidades, um valor para a velocidade de propagação deste. Concluindo-se se esta variação implica, ou não, uma alteração no valor calculado para a velocidade do som.

Outra alteração consiste em variar o tamanho da mangueira, de forma a observar quais as implicações desta variação no intervalo de tempo que decorre entre o som registado primeiramente pelo microfone e o som recolhido à saída da mangueira.

Deverá medir-se a temperatura à qual se encontra o ambiente próximo da mangueira. Este procedimento é relevante na medida em que tal como já foi referido, a temperatura do meio de propagação afecta a velocidade do som. Com base na medição da temperatura é possível comparar os valores obtidos experimentalmente para a velocidade do som no ar com o valor tabelado para esta grandeza à temperatura correspondente.

Por último, é importante descrever as condições em que a actividades decorreu, utilizando-se uma sala com o mínimo de ruído, colocou-se uma toalha no tampo da mesa sobre a qual se colocou a mangueira. A sala apresentava um pavimento em azulejo e um elevado número de vidros, o que influenciou a ocorrência de fenómenos de reflexão e de reverberação dos sons gerados.

### Montagem experimental



### ***9.3.7- Alguns cuidados a ter na realização desta actividade***

- É importante realçar que o som gerado e que irá percorrer a mangueira deverá ser um impulso curto e intenso, de forma a se poder com facilidade identificar os dois “picos” no registo sonoro obtido. Para tal, ir-se-á utilizar a batida de duas estacas de madeira, de um objecto de madeira contra o tampo da mesa na qual se encontra a mangueira, ou mesmo, um bater de palmas extremamente curto ou um choque de dois lápis ou de duas estacas metálicas.
- O som produzido por um simples bater de palmas ou por outras fontes sonoras, deverá ser gerado o mais próximo possível da entrada da mangueira, minimizando as perdas do sinal sonoro gerado.
- É importante salientar as condições do meio no qual se realiza a actividade aqui sugerida, aconselhando-se a realização desta numa sala com um bom isolamento acústico, com carpetes, cortinas, assim como material esponjoso ou mesmo esferovite. É também importante que neste mesmo local se consiga obter um silêncio considerável, pois todos os ruídos que tiverem lugar no meio circundante irão ser registados pelo microfone, dificultando a identificação do sinal sonoro correspondente ao instante de saída do som gerado da mangueira.

### ***9.3.8- Concepções alternativas em estudo***

Muitos alunos manifestam a concepção de que tanto o som como as ondas electromagnéticas são fenómenos instantâneos, não se interrogando, por exemplo, por que motivo primeiro vemos um relâmpago e só depois ouvimos o trovão. Saliente-se que esta concepção poderá ser mais frequente quando nos referimos a ondas electromagnéticas, dada a sua elevada velocidade de propagação.

Outra ideia prévia consiste em considerar que para um dado meio material, a velocidade de propagação de uma onda sonora depende das suas características, nomeadamente da sua frequência e amplitude. Desta forma, não será de admirar que os alunos prevejam que um som



agudo se propague a uma velocidade superior que um som mais grave, ou mesmo, que um som mais intenso tenha uma maior velocidade de propagação.

### ***9.3.9- Questões pré-laboratoriais***

- 1- Identifica todo o material utilizado para a realização da montagem experimental, indicando a sua função.
- 2- Pela exploração do software computacional utilizado na realização desta actividade, identifica quais as grandezas presentes em cada um dos respectivos eixos do registo gráfico obtido.
- 3- Por que motivo se optou pela utilização de uma mangueira para a propagação do som no ar, não realizando a actividade utilizando somente dois microfones colocados a uma distância conhecida? Prevês alguma diferença entre os resultados obtidos para cada uma destas montagens experimentais?
- 4- Por que motivo se utiliza um funil à entrada da mangueira?
- 5- Existirá alguma diferença entre os instantes em que registas o bater de palmas no microfone e o registo do som proveniente da mangueira? Justifica.
- 6- Se comparares os valores obtidos para um bater de palmas e para um toque seco de duas estacas metálicas, o que prevês que aconteça aos intervalos de tempo obtidos em ambos os casos?
- 7- Com base nos dados que poderás obter experimentalmente, constrói um conjunto de procedimentos que te permita calcular a velocidade de propagação do som no interior da mangueira.
- 8- Que efeito, se algum, terá a utilização de uma mangueira de maiores dimensões no valor a encontrar para a velocidade do som?
- 9- Se utilizássemos uma mangueira de dimensões muito superiores, o que prevês que acontecesse ao registo sonoro obtido à saída da mangueira? Verificarias alguma alteração?

### ***9.3.10- Algumas previsões sobre possíveis respostas às questões pré-laboratoriais apresentadas***

Muitos alunos poderão manifestar a ideia de que a propagação do som é um fenómeno instantâneo, motivo este que os levará a responder que não se verifica nenhuma diferença entre o instante em que se regista o som gerado à entrada da mangueira e o instante em que este sinal é registado à saída da mesma. Por outro lado, muitos poderão também ter a ideia de que os sons mais agudos se propagam mais rapidamente que os sons mais graves, motivo este que os levará a prever que o bater de duas estacas metálicas percorrerá mais rapidamente a mangueira do que, por exemplo, um bater de palmas, ou mesmo o bater de duas estacas de madeira.

Os alunos já deverão ter alguma noção do fenómeno de atenuação que tem lugar no interior da mangueira, compreendendo facilmente que o som captado inicialmente pelo microfone deverá ser mais intenso que o som captado à saída da mangueira.

Por último, é importante que os alunos compreendam e identifiquem quais as grandezas que estão em estudo e de que forma estas grandezas poderão, ou não, influenciar o valor obtido experimentalmente para a velocidade do som.

### ***9.3.11- Resultados obtidos experimentalmente***

Na execução da presente actividade optou-se por gerar uma onda sonora através de um bater de palmas e pelo toque de duas estacas metálicas. A recolha destes sinais sonoros foi realizada com um microfone ligado a um computador, recorrendo à utilização do software Cool Edit para a aquisição dos dados. Neste processo de aquisição escolheu-se uma taxa de recolha de 19200 amostras por segundo.

Na realização da actividade experimental procedeu-se à produção de diferentes ondas sonoras geradas por um bater de palmas e por duas estacas metálicas, recolhidas pelo microfone ligado a um computador portátil.

Os registos sonoros obtidos para cada um dos impulsos sonoros gerados apresentam-se na **Figura 9.30 e 9.31**. Pela análise destas figuras é possível identificar, embora com um certo erro associado à sua determinação, o intervalo de tempo decorrido entre o sinal inicial que chega ao microfone e o pico correspondente ao sinal sonoro detectado após este ter atravessado

uma mangueira com um comprimento de 15,5 m e de 18,5 m. Recorrendo à equação  $\bar{v} = \frac{\bar{d}}{\bar{t}}$  é possível estimar um valor experimental para a velocidade de propagação do som no ar.

Antes de mais, procedeu-se à medição da temperatura à qual se encontrava a sala no início da actividade, encontrando-se um valor de 19°C. Com base na equação  $v = 332 + 0,6t$ , determinou-se um valor teórico para a velocidade de propagação do som de 343,4 m/s, não tendo em atenção a humidade relativa do ar circundante.

Na **Tabela 9.3** são apresentados os resultados obtidos experimentalmente, utilizando duas mangueiras com diferentes comprimentos, tendo-se realizado no mínimo três ensaios, até se obter valores concordantes.

### Registo dos resultados experimentais obtidos

$\bar{d}(\text{m})$	Fonte geradora Do sinal sonoro	$t_i(\text{s})$	$\bar{t}(\text{s})$	$N$	$\bar{v} = \frac{\bar{d}}{\bar{t}} \text{ (m/s)}^1$
15,5	Duas estacas metálicas	0,0461	0,0460	2029	$337 \pm 1$
		0,0459			
		0,0462			
		0,0460			
	Um bater de palmas	0,0457	0,0455	2007	$341 \pm 2$
		0,0453			
		0,0450			
		0,0460			
19,5	Duas estacas metálicas	0,0565	0,0570	2513	$342 \pm 3$
		0,0575			
		0,0572			
		0,0568			
	Um bater de palmas	0,0564	0,0568	2505	$343 \pm 4$
		0,0572			
		0,0562			
		0,0574			

Tabela 9.3

<sup>1</sup> Para o cálculo da propagação do erro associado à velocidade utilizou-se a seguinte equação:  $\frac{\Delta v}{\bar{v}} = \frac{\Delta d}{\bar{d}} + \frac{\Delta t}{\bar{t}}$ ,

onde se considerou que  $\Delta d = 0,0005 \text{ m}$  e  $\Delta t = 0,0002 \text{ s}$

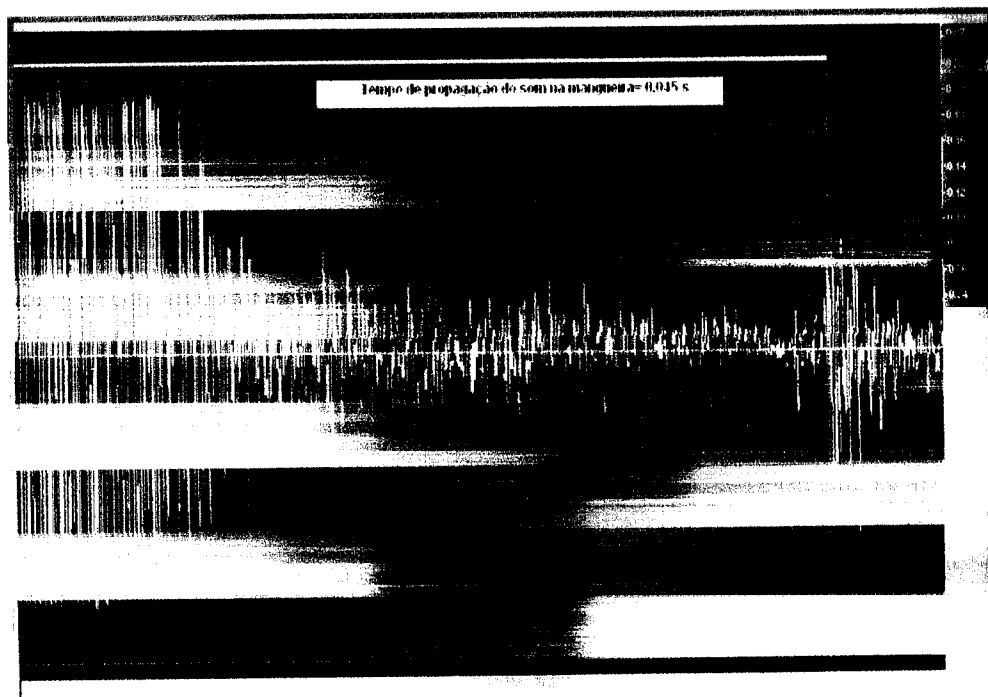
Em que:

$t_i \rightarrow$  Intervalo de tempo decorrido entre o som que entra na mangueira e o registado à saída da mesma;

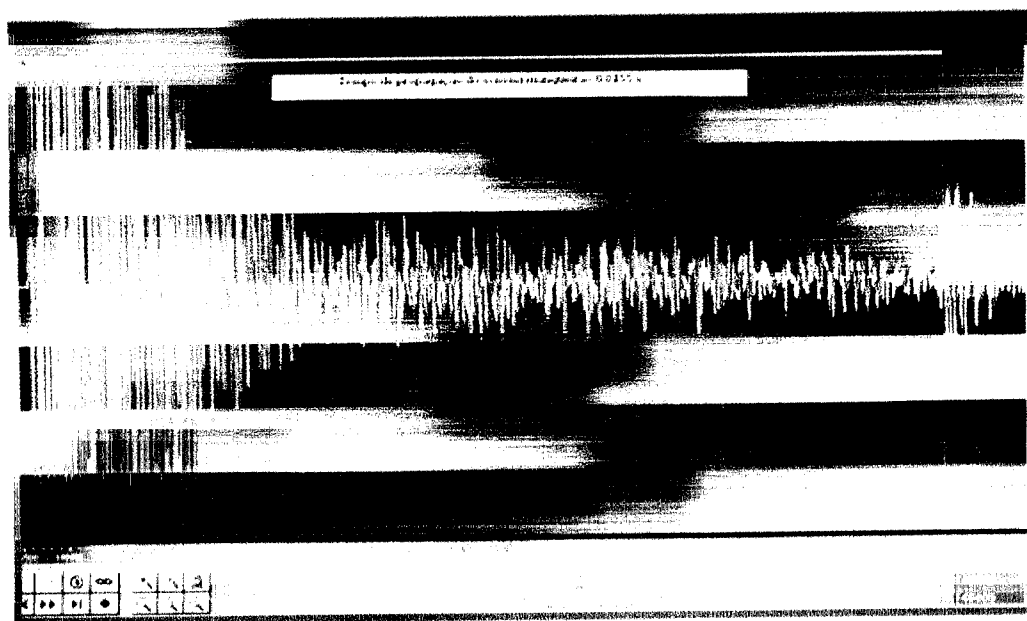
$\bar{t} \rightarrow$  Média dos intervalos de tempo obtidos para cada um dos respectivos ensaios;

$N \rightarrow$  Número de recolha de amostras correspondente a cada intervalo de tempo;

$\bar{v} \rightarrow$  Velocidade de propagação média obtida para cada uma das ondas sonoras.



**Figura 9.30-** Registro sonoro do som gerado por um bater de duas estacas metálicas que percorre uma mangueira de 15,5 m.



**Figura 9.31-** Registro sonoro do som gerado por um bater de palmas que percorre uma mangueira de 15,5 m.

Convém salientar que no final da realização da actividade, a temperatura à qual se encontrava a sala apresentava um valor superior, de  $21^{\circ}\text{C}$ , o que poderá ser justificado pela presença dos alunos e do professor na sala de aula. Esta variação poderá ter influenciado os valores obtidos para a velocidade de propagação do som nos diferentes ensaios.

Outra conclusão importante a retirar é que um aumento do comprimento da mangueira implica, por um lado, um aumento do tempo que o som demora a percorrer e a sair da mangueira, assim como uma menor amplitude do som à saída da mesma. No entanto, é necessário ter em atenção, relativamente à segunda conclusão aqui apresentada, que a amplitude do sinal sonoro detectado à saída da mangueira irá depender da intensidade sonora do som gerado. Assim, em diferentes ensaios, ao bater as palmas poderão ter-se gerado sons com diferentes intensidades.

### *9.3.12- Questões pós-laboratoriais*

- 1- Interpreta o registo sonoro que obtiveste experimentalmente.
- 2- Como justificas a existência de uma nova subida na amplitude do sinal sonoro registado, decorrido algum tempo sobre a geração do sinal sonoro? Qual o significado físico deste registo?
- 3- Com base no registo sonoro obtido experimentalmente para cada um dos sons gerados e realizando as medições necessárias, obtém um valor experimental para a velocidade de propagação do som no interior da mangueira.
- 4- Que erros estão inerentes ao valor da velocidade do som determinado experimentalmente?
- 5- Que parâmetro pode ser alterado de forma a fazer variar o intervalo de tempo que decorre entre os registos da onda gerada e da onda detectada à saída da mangueira?
- 6- Que efeitos, se algum, apresenta a variação deste parâmetro na amplitude do sinal detectado à saída da mangueira?
- 7- Como justificas a diferença entre o valor calculado experimentalmente e o valor tabelado para a velocidade de propagação do som no ar, para a mesma temperatura?
- 8- Que efeito teria, se algum, a variação da temperatura nas grandezas medidas experimentalmente?
- 9- Prevê o que aconteceria se usássemos uma mangueira com o mesmo comprimento e feita de um material diferente.

- 10- Existiria alguma diferença no registo sonoro obtido se fosse utilizada uma mangueira com um diâmetro superior?
- 11- O registo sonoro obtido iria sofrer alguma alteração se em vez da mangueira enrolada, se realizasse a actividade com a mangueira esticada? Se sim, indica qual e pensa nos processos responsáveis por essa alteração.
- 12- Com base nos resultados obtidos experimentalmente e se pudesses repetir esta actividade, alterarias algum passo do procedimento levado a cabo, de forma a otimizar estes mesmos resultados?

### ***9.3.13- Algumas conclusões importantes a retirar***

Uma conclusão importante consiste no facto da velocidade de propagação das ondas sonoras no ar ser independente da sua frequência, ou neste caso, ao se tratar de um impulso, do conjunto de frequências que o caracterizam. Por outro lado, a velocidade de propagação do som pode ser facilmente calculada sabendo o comprimento da mangueira e o tempo que este leva a percorrê-la. Logo, quanto maior for o comprimento da mangueira maior será a diferença de tempo entre os dois impulsos sonoros detectados pelo microfone, o que nos poderá ajudar a distinguir o pico correspondente à saída do som da mangueira em relação ao do som que entra na mesma, ficando os sinais mais afastados.

Note-se, no entanto, que um aumento do comprimento da mangueira irá contribuir para o aumento do fenómeno de atenuação que tem lugar no interior da mesma, motivo pelo qual se verifica uma diminuição da amplitude do sinal recolhido à saída desta.

Será importante sistematizar que a intensidade do som registado à saída da mangueira é muito inferior à inicial, devendo-se de um modo geral entender a intensidade de uma onda como a taxa média temporal de transferência de energia por unidade de área, numa determinada região do espaço. No caso das ondas acústicas, esta intensidade encontra-se relacionada com a amplitude do deslocamento das partículas que constituem o meio, a densidade deste, mas também da velocidade e da frequência da onda propagada.

A análise dos resultados obtidos permitirá introduzir aos alunos o fenómeno de atenuação do sinal sonoro, o qual tem lugar no interior da mangueira. De um modo geral, podemos definir atenuação como o processo associado à perda da intensidade do sinal sonoro à medida que este se propaga ao longo de um determinado meio. Esta perda de energia encontra-

se associada à ocorrência de processos de absorção e refração no meio no qual a onda se propaga. Desta forma, quando se aumentar o tamanho da mangueira também irão aumentar as reflexões e absorções no interior da mesma, havendo também um aumento da atenuação. Por outro lado, se a mangueira se encontrar enrolada, as reflexões no interior da mesma também irão sofrer um aumento. Das diferentes previsões acima apresentadas, apenas a de que um aumento do comprimento da mangueira irá implicar um aumento do fenómeno de atenuação do sinal poderá ser verificada experimentalmente, mas para tal terá que se utilizar uma fonte sonora com uma amplitude de sinal constante. Mesmo assim, não é claro que os métodos de recolha de dados utilizados sejam suficientemente precisos para permitir retirar estas conclusões.

No que diz respeito ao processo de reflexão de uma onda, é relevante referir que tal como um feixe de luz, também o som é passível de sofrer reflexão, segundo o princípio de que o ângulo de incidência do raio incidente é igual ao de reflexão. Relativamente ao tipo de materiais utilizados será de esperar que mangueiras de diferentes materiais apresentem graus de absorção bastantes variáveis. Esta conclusão permite explicar por que motivo as salas de espectáculo são revestidas de materiais esponjosos e não de madeira.

Outra das conclusões importantes a retirar consiste no facto de que no caso de diferentes sons gerados pela mesma fonte sonora, mas com diferentes intensidades, apenas se verifica uma alteração na amplitude do sinal registado, sem que esta variação altere a velocidade de propagação das ondas acústicas. Conclusões semelhantes se poderão retirar relativamente a sons gerados por diferentes fontes, e portanto, com diferentes características.

Os alunos deverão compreender a importância de se proceder a uma medição da temperatura média do meio no qual se realiza a actividade, compreendendo de que forma é que esta grandeza afecta a velocidade de propagação do som, assim como as implicações que uma alteração deste parâmetro teria no valor calculado experimentalmente para a velocidade de propagação do som.

Por último, após a análise dos resultados obtidos experimentalmente, nomeadamente a comparação do valor da velocidade do som obtido para a respectiva temperatura com o valor teórico tabelado, os alunos deverão ser capazes de identificar possíveis fontes de erro que possam ter afectado este resultado, assim como de fazer sugestões de alterações ao procedimento levado a cabo. Esta análise torna-se importante na medida em que lhes permite



reflectir sobre a eficácia da actividade por eles desenvolvida realizando uma análise crítica aos resultados obtidos.

### **9.3.14- *Análise pós-aula***

#### **9.3.14.1- Caracterização da amostra e condições de realização da actividade**

A presente actividade teve lugar numa turma do 11ºano, com 15 alunos que apresentavam uma idade situada entre os 15 e os 17 anos. A actividade foi realizada no terceiro período do ano lectivo em causa, o que implica que nesta fase já haviam sido leccionados os conceitos aqui abordados. Desta forma, e antes de dar início à presente actividade, o professor realizou um debate que permitisse relembrar os mesmos.

No que se refere à postura manifestada pelos alunos ao longo da actividade é importante comentar que os mesmos não se mostraram tão motivados e curiosos perante a realização da mesma como se constatou no 8º ano. No entanto, verificou-se que o facto desta actividade não funcionar como elemento de avaliação funcionou como elemento facilitador para a promoção de um espírito mais investigativo. Desta forma, os alunos colocaram mais questões, sentiram-se mais à vontade para experimentar, testar, levantar hipóteses e testar as mesmas. Verificou-se, ainda, que estes realizaram um maior número de previsões e hipóteses, mesmo quando estas pareciam algo disparatadas. Isto mostrou-se bastante satisfatório, pois um dos receios iniciais para esta actividade foi que os alunos não se envolvessem na realização da mesma.

#### **9.3.14.2- Antes de realizar a actividade**

A aula teve início fazendo referência às características das ondas acústicas, sendo estas apresentadas como ondas elásticas, cuja propagação resulta da geração de zonas de compressão e rarefacção (caso do meio gasoso), no qual as partículas se comportam como pequenos osciladores. Foram discutidos os conceitos de frequência, amplitude, intensidade sonora, assim como efectuada a distinção entre ondas longitudinais e transversais. No estudo das ondas sonoras, enquanto ondas de pressão, recorreu-se à exploração do exemplo da onda-mania, concluindo-se que estas ondas podem ser descritas como perturbações de densidade e pressão.

Em seguida, foram apresentados os objectivos gerais da actividade experimental em causa, nomeadamente o estudo da velocidade de propagação das ondas sonoras e os factores

que influenciam esta grandeza. Foi discutida a forma de propagação das ondas sísmicas na crosta terrestre, colocando-se algumas questões:

- 1- *“Que tipo de ondas sísmicas conhecem? O que as permitem distinguir?”;*
- 2- *“O que podemos afirmar relativamente à velocidade de propagação das ondas S e P? Serão idênticas?”.*

Pretende-se, também, que os alunos discutam as diferentes formas de vibração do meio de propagação em cada tipo de ondas, relacionando com os danos causados nos edifícios à sua passagem.

Obteve-se a seguinte resposta:

- 1- *“Os seus valores dependem dos sítios pelos quais estas passam, da mesma maneira que uma onda sonora se propaga com diferentes velocidades dentro e fora de água.” (aluno 1).*

Um aluno acrescentou que as ondas sísmicas dão informação sobre a constituição da crosta terrestre. Neste contexto, explorou-se com os alunos os diferentes tempos de chegada das ondas sísmicas à superfície terrestre. Estes foram incentivados a explicar esta situação, surgindo algumas respostas curiosas:

- 1- *“A mesma onda pode andar mais depressa ou mais devagar consoante o meio em que se propaga. Do mesmo modo que nós ao andar de carro podemos atingir diferentes velocidades consoante o piso seja de terra batida ou de asfalto.” (aluno 1);*
- 2- *“Depende da oposição do meio à passagem da onda.” (aluno 1);*
- 3- *“Depende do tipo de ondas a que nos referimos. Por exemplo, as ondas luminosas são muito mais rápidas que as sonoras, por isso durante uma tempestade de trovoada primeiro vemos o relâmpago e só depois o trovão.” (aluno 2);*

Pela análise desta última resposta podemos concluir que o aluno em questão relaciona acima de tudo a velocidade de uma onda com as características da própria onda, não fazendo referência às características do meio no qual esta se propaga.

Num clima de debate, os alunos chegaram à conclusão que a velocidade com a qual uma onda se propaga depende não só das características da própria onda (por isso as ondas S atingem uma estação sismológica antes das ondas P), mas também das características do meio no qual estas se propagam. Um aluno colocou uma questão pertinente que permitiu avançar com o estudo dos factores que influenciam a velocidade de propagação de uma onda sonora:

*“Então, quais são as características que deverá apresentar um meio para que a velocidade de uma onda sísmica seja máxima?” (aluno 3).* Como resposta a esta questão, a maioria dos alunos considerou que os factores mais relevantes seriam:

- 1- *“A viscosidade do meio”;*
- 2- *“A densidade do meio” (aluno 2);*
- 3- *“A resistência do meio à passagem da onda” (aluno 1);*
- 4- *“A constituição do meio” (aluno 1).*

Com a ajuda do professor, os alunos foram encaminhados a realizar uma analogia do modo de propagação de uma onda sísmica na crosta terrestre com a velocidade de propagação de uma onda sonora num gás. Desta forma, e ao associar a propagação da onda ao movimento de oscilação das partículas que constituem o meio, os alunos concluíram que:

- 1- *“Quanto mais facilmente as partículas vibrarem, ou seja, quanto mais elástico for o meio, maior a velocidade com que a onda avança neste meio” (aluno 3).*

Em seguida, e numa tentativa de tentar compreender algumas das ideias prévias dos alunos sobre os conceitos em causa, colocou-se a seguinte questão:

*“Supõe que duas ondas sonoras se propagam no ar, em que uma delas se caracteriza por um som extremamente agudo e a outra corresponde a um som mais grave. O que podemos afirmar se compararmos a velocidade de propagação de ambas?”.* Tal como previsto inicialmente, os alunos responderam na sua maioria que o som mais agudo se propagava mais rapidamente. Partindo do princípio que a propagação do som não é um fenómeno instantâneo, os alunos foram confrontados com a seguinte situação:

*“Supõe que estás a ouvir um concerto de uma orquestra, sentado no final de uma plateia. O que ouvirás primeiro: o som da flauta transversal ou do trombone?”* Após alguma reflexão, os alunos chegaram à conclusão que a velocidade de propagação de uma onda sonora não depende da sua frequência mas sim das características do meio no qual esta se propaga. De outra forma, e tal como afirmou um aluno:

- 1- *“Assistir a um concerto ao vivo seria uma confusão!” (Aluno 4).* E isto porque o facto dos sons produzidos pelos diferentes instrumentos apresentarem valores de frequência bastante diferentes e característicos iria influenciar a velocidade de propagação dos mesmos, e desta forma, os instantes em que estes iriam chegar à plateia seriam distintos.

### 9.3.14.3- O decorrer da actividade

Depois de abordados os conceitos fundamentais subjacentes a esta actividade, procedeu-se à realização da mesma. Com base nos objectivos propostos inicialmente, os alunos estabeleceram um procedimento que lhes permitisse cumprir os mesmos. Com a orientação do professor, um aluno propôs que se dividissemos o comprimento da mangueira pelo tempo que um som leva a percorrê-la, poderíamos saber a velocidade de propagação do som no ar. Restava então arranjar forma de determinar o intervalo de tempo que decorre desde a entrada da onda na mangueira até esta sair da mesma.

É importante neste momento analisar as respostas dos alunos às questões pré-laboratoriais. No que respeita às respostas obtidas à questão número 3 (*“Por que motivo se optou pela utilização de uma mangueira para a propagação do som no ar, não realizando a actividade utilizando somente dois microfones colocados a uma distância conhecida? Prevê-se alguma diferença entre os resultados obtidos para cada uma destas montagens experimentais?”*) obtiveram-se os seguintes resultados:

- 1- *“A mangueira deixa escapar menos som”*;
- 2- *“Para conduzir melhor o som para o microfone”*;
- 3- *“Para evitar perdas de som”*;
- 4- *“Se utilizássemos dois microfones obtínhamos um registo sonoro muito mais fraco”*;
- 5- *“A amplitude do sinal sonoro registado pelo microfone seria inferior”*.

Através das respostas aqui obtidas podemos concluir que estes alunos possuem a ideia de que o som ao longo da sua propagação sofre um processo de atenuação, no entanto, os termos e o tipo de linguagem utilizada por estes continua a não ser o mais correcto. Por exemplo, estes alunos referem-se a um som *“mais baixo”* ou *“mais fraco”* quando querem designar um som menos intenso e caracterizado por um valor de amplitude inferior. Por sua vez, continuam a referir o termo *“perdas de som”* para designar o processo de absorção ou atenuação, mesmo após se ter inicialmente feito referência a estes conceitos no início da onda.

Como resposta à questão número 4 (*“Por que motivo se utiliza um funil à entrada da mangueira?”*) obtiveram-se as seguintes afirmações:

- 1- *“Para perdermos menos sinal sonoro”*;
- 2- *“Para concentrar o som para o interior da mangueira” (aluno 4)*;
- 3- *“Para evitar menos perdas do impulso sonoro para o exterior da mangueira, obtendo-se uma maior amplitude de sinal à saída da mesma” (aluno 1 e 2)*;

Logo de seguida, os alunos concluíram que por motivos semelhantes se utilizou apenas um microfone, tendo mesmo um aluno afirmado que *“Deveríamos obter melhores resultados com um som o mais curto possível, de modo a facilitar a identificação do mesmo à entrada e saída da mangueira”* (aluno 2).

Na resposta à questão 6 (*“Caso consideres que se verifica uma diferença entre os dois tempos registados no microfone, e se comparares os valores obtidos para um bater de palmas e para um toque seco de duas estacas metálicas, o que prevês que aconteça aos intervalos de tempo obtidos em ambos os casos?”*), e tal como seria de prever, os alunos responderam que um bater de palmas leva muito mais tempo a percorrer a mangueira do que um toque seco gerado com duas estacas. No entanto, um aluno logo corrigiu o colega fazendo referência ao exemplo explorado anteriormente sobre a forma como os sons de diferentes instrumentos se propagam quando ouvimos uma orquestra a tocar (aluno 1).

No que respeita à questão 8 (*“Que efeito, se algum, terá a utilização de uma mangueira de maiores dimensões na realização da actividade aqui descrita?”*) obtiveram-se as seguintes respostas por parte dos alunos:

- 1- *“Com uma mangueira de maiores dimensões obter-se-ia à saída desta um sinal mais fraco”* (aluno 2);
- 2- *“O som percorre uma maior distância e logo à saída este é mais baixo, porque perde-se som no interior da mangueira”* (aluno 5). Este aluno refere-se a um processo de absorção no interior da mangueira, terá talvez em mente que as paredes da mangueira absorvem algum som à sua passagem;
- 3- *“Como o som percorre uma maior distância no interior da mangueira, este é mais absorvido e o sinal obtido à saída é menos intenso”* (aluno 1).

Na resposta à questão número 5 (*“Existirá alguma diferença entre os instantes em que registas o bater de palmas no microfone e o registo do som proveniente da mangueira? Justifica.”*), alguns alunos responderam que o som tem uma velocidade tão elevada que não existe uma forma de podermos detectar esta diferença. Estes alunos têm a ideia de que existe uma diferença, mas que talvez este fenómeno seja tão complexo ou rápido que é impossível observá-lo e estudá-lo.

Os alunos realizaram diferentes ensaios para cada fonte geradora de som, porque por vezes o impulso sonoro era tão intenso que se verificava uma saturação do registo realizado pelo microfone. Outras vezes o impulso era demasiado prolongado, não sendo possível

distinguir os dois sinais à entrada e à saída da mangueira. Após algumas tentativas, os alunos chegaram à conclusão que para a obtenção de melhores resultados e uma distinção clara entre os picos pretendidos era imperativo que se gerasse um sinal extremamente curto, que não fosse demasiado intenso e o mais próximo possível do funil.

Em seguida, um aluno propôs que se utilizasse um mesmo som com diferentes intensidades, de modo a verificar qual dos impulsos iria percorrer a mangueira num menor intervalo de tempo, tendo este mesmo aluno proposto que verificássemos experimentalmente se a velocidade de propagação do bater de duas estacas de madeira era igual à do impulso gerado por duas estacas metálicas.

Posteriormente, e pela análise dos resultados e registos sonoros obtidos experimentalmente, procedeu-se à exploração das questões de pós-laboratório elaboradas, de forma a confirmar ou rejeitar as hipóteses colocadas inicialmente, tentar alterar algumas ideias prévias dos alunos, assim como sistematizar alguns conceitos e conteúdos. Na prática, observou-se que muitos alunos tiveram inicialmente muita dificuldade em identificar o pico correspondente à saída do sinal sonoro da mangueira, julgando que este se situaria imediatamente a seguir ao impulso de entrada já que consideram a propagação do som um fenómeno quase instantâneo.

#### **9.3.14.4- Reflexão crítica aos resultados obtidos**

A partir da análise dos resultados obtidos experimentalmente e das respostas dos alunos às questões de pós-laboratório, considera-se que foram cumpridos muitos dos objectivos propostos inicialmente, na medida em que ficou claro para os alunos que a velocidade de propagação do som não depende das características do som gerado, nomeadamente, dos valores de frequência que o caracterizam. Mas para retirar tal conclusão, foi necessário justificar as discrepâncias entre os valores obtidos experimentalmente, admitindo que estas se devem a uma incerteza na localização do pico correspondente ao registo do sinal sonoro à saída da mangueira. Por outro lado, verificou-se que ficou claro para a maioria dos alunos que o valor da velocidade de propagação do som não depende da intensidade do som gerado, para uma mesma fonte sonora.

Como resposta à questão de pós laboratório nº4 (*“Que erros estão inerentes ao valor da velocidade do som determinado experimentalmente?”*), obtiveram-se as seguintes respostas:

- 1- *“Dificuldade em identificar o pico correspondente”*;

- 2- *“Perda de sinal sonoro à entrada da mangueira e no percurso do som ao longo da mangueira”;*
- 3- *“A velocidade varia consoante as características do som gerado”;*
- 4- *“Diferença de temperatura do meio”.*

Deste modo, podemos concluir que muitos dos alunos conseguiram identificar os principais erros associados aos resultados obtidos. Note-se, no entanto, pela hipótese número três, dada por alguns alunos, que estes não alteraram as suas ideias e hipóteses iniciais, apesar das evidências apresentadas.

Relativamente à exploração da resposta à questão 5 (*“Que parâmetro pode ser alterado de forma a fazer variar o intervalo de tempo que decorre entre os registos da onda gerada e da onda detectada à saída da mangueira?”*) verificou-se que inicialmente alguns alunos consideraram que se o som fosse mais grave ou mais intenso o intervalo de tempo seria superior. Uma pequena percentagem de alunos considerou que poderíamos aumentar o tamanho da mangueira. As respostas obtidas foram:

- 1- *“Diminuir o diâmetro da mangueira, dificultando a passagem do som ao longo da mesma” (aluno 1);*
- 2- *“Nenhum” (aluno 5);*
- 3- *“Gerar um som mais grave” (A maioria dos alunos).*

As respostas obtidas para a questão 6 (*“Que efeitos apresenta a variação deste parâmetro na amplitude do sinal detectado à saída da mangueira?”*) foram as seguintes:

- 1- *“O som detectado à saída seria mais fraco”;* **Resposta dada por uma pequena fracção de alunos.**
- 2- *“O pico correspondente à saída do som da mangueira seria menor”;*
- 3- *“A amplitude do sinal seria menor” (aluno 2);*
- 4- *“O sinal seria menos intenso” (aluno 1);*
- 5- *“Nenhum” (aluno 3, 5 e 6).*

De forma a testar estas hipóteses, utilizou-se uma mangueira com o mesmo diâmetro mas com um comprimento superior, seleccionando-se como fontes geradoras de som o som gerado pelo bater de duas estacas de madeira e de metal.

Na discussão à questão número 8 (*“Que efeito teria, se algum, a variação da temperatura nas grandezas medidas experimentalmente?”*) e 9 (*“Que efeito teria, se algum, se*

usássemos uma mangueira com o mesmo comprimento e feita de um material diferente?”) obteve-se a seguinte resposta dada por uma pequena fracção de alunos:

“Como a velocidade de propagação de uma onda depende das características do meio e da temperatura, então irá apresentar valores diferentes”. Por um lado, poder-se-á concluir que os alunos compreenderam que a velocidade de propagação de uma onda depende da temperatura, e por outro, que o meio no qual a onda de propaga influencia o valor desta grandeza. No entanto, os alunos não concluíram que os diferentes fenómenos de reflexão, absorção e atenuação que terão lugar no interior de uma mangueira feita de material diferente também irão influenciar a intensidade do som à saída da mesma.

No que respeita à questão número 10 (“Existiria alguma diferença no registo sonoro obtido se fosse utilizada uma mangueira mais larga?”), obtiveram-se as seguintes respostas:

- 1- “A velocidade seria superior porque haveria menos oposição à passagem do som.”;  
**(Resposta maioritária)**
- 2- “Não haveria alteração de velocidade, apenas da intensidade do som, porque haveria menor absorção do som na mangueira e choques das ondas contra as paredes” (aluno 1, 2 e 3).

Pela análise destas respostas pode-se concluir que os alunos continuam a mostrar uma certa confusão entre o conceito de velocidade de propagação de uma onda, os factores que influenciam esta grandeza e o conceito de intensidade sonora. Isto é notório quando estes consideram que a velocidade de uma onda é maior numa mangueira mais larga porque a oposição à passagem da mesma tem um valor inferior. Estes mesmos alunos provavelmente responderiam afirmativamente quando questionados se o som se propaga mais rapidamente no vazio do que em qualquer outro meio.

Finalmente, como resposta à questão 11 (“O registo sonoro obtido iria sofrer alguma alteração se em vez da mangueira enrolada, se realizasse a experiência com a mangueira esticada? Se sim, indica qual e pensa nos processos responsáveis por essa alteração”) obtiveram-se os seguintes resultados:

- 1- “Nenhuma”;
- 2- “A velocidade era superior” **(Resposta maioritária)**;
- 3- “A intensidade do registo era superior porque as ondas chocavam menos contra as paredes da mangueira e era mais fácil a sua passagem”. (aluno 1 e 2)



#### **9.3.14.5- Principais conclusões sobre o decorrer da actividade e algumas sugestões para futuras aplicações**

Nesta fase da actividade é importante proceder a uma análise transversal às ideias que os alunos apresentavam no início da aula e se realmente estes, pelo menos a maioria, conseguiu alterar as suas ideias com base nas estratégias utilizadas, evidências e resultados apresentados e consequente exploração e interpretação dos mesmos.

Desta forma, uma primeira conclusão de âmbito mais geral a apresentar é o facto de muitos dos alunos mostrarem permanecer com as mesmas ideias que possuíam inicialmente, mesmo após a realização da actividade. Isto poderá notar-se na resposta à questão pós laboratorial nº10, em que estes continuam a confundir os conceitos de amplitude sonora e de velocidade de propagação do som.

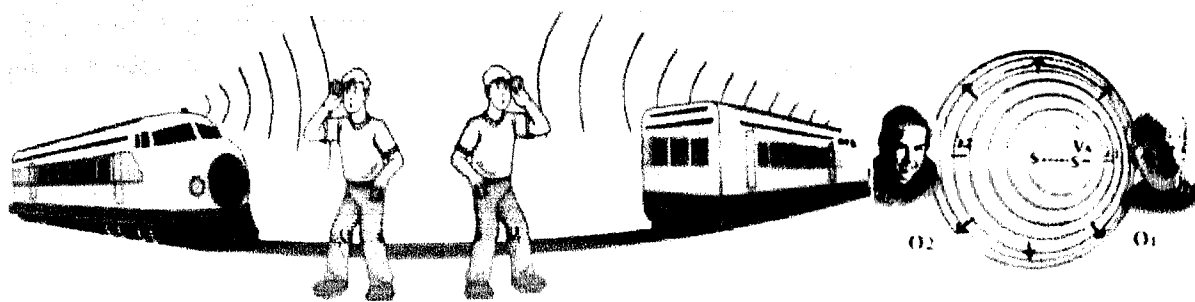
No entanto, no que respeita à compreensão de que a velocidade de uma onda sonora só depende das características do meio e não da sua frequência, considera-se que tal objectivo foi bem conseguido. Por outro lado, os alunos aceitaram com facilidade que podemos medir a diferença entre o som à entrada da mangueira e à saída, que realmente o som não é um fenómeno instantâneo e que, por outro lado, não necessitamos de protocolos experimentais rebuscados recorrendo a materiais extremamente caros para que este tempo de propagação possa ser medido.

Também é de notar que os alunos já haviam leccionado os conceitos em causa. No entanto, nota-se que muitas vezes, quando questionados directamente em situações práticas e apesar de já terem conhecimento dos princípios e conteúdos cientificamente correctos, os alunos na sua maioria optam por considerar como válidas as suas ideias iniciais.

Após uma análise global ao decorrer da actividade, pensa-se que talvez pudessem ter sido melhor explorados com os alunos os fenómenos de absorção, reflexão e atenuação, o que poderia ter esclarecido algumas das confusões manifestadas, nomeadamente na resposta às questões de pós-laboratório 10 e 11. Também a utilização de um outro meio no qual o som se propagasse seria uma actividade interessante de ser levada a cabo, como, por exemplo, recorrendo a um meio líquido. No entanto, saliente-se que a presente actividade foi realizada numa escola secundária, recorrendo-se à utilização de material considerado acessível em muitas das nossas escolas.

## *Actividade Nº3*

### *Estudo do Efeito Doppler em situações do quotidiano*



### ***9.4.1- Introdução à actividade***

Esta actividade apresenta-se como uma sugestão interessante para a abordagem do Efeito Doppler em contexto de sala de aula. Na realização da mesma, os alunos serão confrontados com um contexto problemático através do qual se pretende estudar o modo de funcionamento de um radar policial, assim como os conceitos físicos com este relacionado.

A referida actividade destina-se a alunos do 11º ano de escolaridade, salientando-se que apesar do Efeito Doppler não ser abordado neste nível de escolaridade, de acordo com as orientações curriculares em vigor, este conteúdo encontra-se relacionado com a temática das ondas acústicas, incorporada na Unidade “*Comunicação a longas e curtas distâncias*”, da componente de Física do respectivo Programa. Por outro lado, e tendo em atenção que um currículo é passível de alteração, nada garante que este conteúdo não possa aparecer, num futuro próximo, como um tópico a ser leccionado. Saliente-se, ainda, o elevado interesse deste fenómeno, o qual aparece associado a diferentes contextos do dia a dia, tais como o da prevenção rodoviária.

De acordo com o público-alvo para esta actividade laboratorial, dever-se-á ter em conta os conhecimentos prévios destes alunos sobre os conceitos a serem aqui explorados, assim como possíveis concepções alternativas a eles associados. A aplicação desta actividade poderá constituir uma boa oportunidade para rever conceitos variados, desde os associados à propagação das ondas mecânicas e suas características, até noções de cinemática, tais como o conceito de velocidade, aceleração e ainda as Leis de Newton.

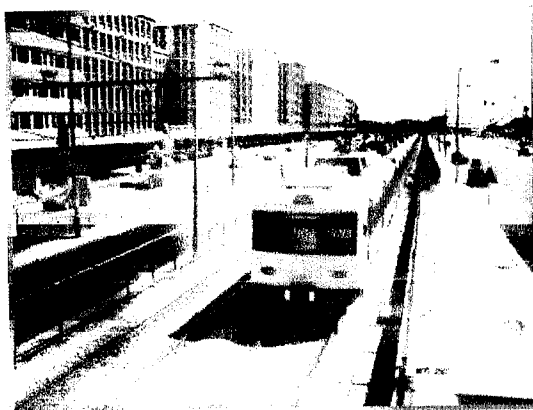
É ainda importante referir que a implementação desta actividade será acompanhada de um guião a ser entregue aos alunos aquando da execução do procedimento experimental previamente planeado (**Apêndice III**).

### **9.4.2- Contextualização científica ao tema**

Em 1842, Christian Doppler verificou experimentalmente que a frequência de uma onda sofre um aumento aparente no seu valor na situação em que a fonte geradora desta onda se aproxima relativamente a um observador. Pelo contrário, verificou que quando a fonte e o observador se afastam, ocorre uma diminuição no valor desta grandeza. Este efeito já havia sido descoberto e estudado relativamente ao “*Deslocamento para o vermelho*” da luz emitida pelas estrelas. A existência deste efeito pode ser facilmente comprovada recorrendo a diversas situações do dia a dia, como, por exemplo, ao analisar o som emitido pela sirene de uma ambulância ou por um comboio, quando estes veículos se movimentam relativamente a um observador estacionário.

Ao longo desta actividade, ir-se-á proceder ao estudo do Efeito Doppler associado a uma onda sonora, tentando explicar, por exemplo, por que motivo a sirene de uma ambulância aparenta ter um som mais grave à medida que a distância desta ao ouvinte em causa aumenta.

Na actividade aqui proposta, pretende-se demonstrar experimentalmente que a frequência de um som sofre uma variação quando a fonte que o produz se movimenta relativamente a um observador estacionário. Ao longo do movimento da fonte, mais precisamente no instante exacto em que esta passa pelo observador, verifica-se que a frequência do som emitido sofre uma queda abrupta, transitando-se de uma situação em que a fonte se aproximava do observador para a situação em que esta começa a distanciar-se relativamente ao mesmo.



**Figura 9.32-** Movimento de um comboio relativamente a um indivíduo em repouso na estação.

Embora esta actividade se limite ao estudo do Efeito Doppler no contexto das ondas acústicas, é importante ter a noção que este é um efeito associado a todo o tipo de ondas. Este fenómeno ocorre, também, com ondas electromagnéticas, sendo utilizado, por exemplo, na segurança rodoviária (em sistemas de radar) para a medição da velocidade instantânea de um veículo numa determinada zona. Será, ainda, curioso referir que este efeito é utilizado por astrofísicos no estudo do movimento relativo das estrelas, galáxias e outros corpos celestes, chegando mesmo o servir de argumento para a Teoria do Universo em expansão, conduzindo à formulação da Teoria do Big-Bang (Jewett & Serway, 2002).

No estudo do Efeito Doppler ao longo do presente trabalho optou-se por explorar o exemplo de um ciclista (**observador O**) que se aproxima com uma velocidade  $v_0$  de uma fonte pontual  $S$ , a qual corresponde ao apitar de um carro. Por uma questão de simplificação ir-se-á considerar que o ar circundante se encontra estacionário e que o observador se move directamente para a fonte. Neste caso, o observador capta uma onda sonora com uma frequência denominada de  $f'$ , a qual apresenta um valor superior à frequência  $f$  que caracteriza a onda emitida pela fonte sonora (Jewett & Serway, 2002).

No caso, em que tanto a fonte como o observador se encontram em repouso, verifica-se que a frequência da onda captada é idêntica à frequência da onda emitida pela fonte. Se, pelo contrário, o observador se aproximar da fonte com uma velocidade  $v_0$ , então, neste caso, verifica-se que a velocidade relativa da onda sonora captada pelo observador irá apresentar um valor superior ao da velocidade de propagação do som no ar.

O que acontece é que, estando a onda sonora a aproximar-se do observador com uma velocidade  $v$ , e o observador a aproximar-se da fonte sonora com uma velocidade  $v_0$ , a velocidade relativa do som medida pelo observador é dada por:

$$v_{relativa} = v + v_0 \quad [64]$$

A frequência  $f'$  da onda captada pelo observador é então  $f' = \frac{v_{rel}}{\lambda} = \frac{v + v_0}{\lambda}$ ; uma vez

que  $\lambda = \frac{v}{f}$ , a frequência  $f'$  detectada por um observador O que se aproxima relativamente a

uma fonte sonora  $S$  é dada por:

$$f' = \frac{f(v + v_0)}{v} \quad [65]$$

Considere-se agora que é a fonte sonora que se movimenta com uma velocidade  $v_F$  relativamente ao observador O que se encontra em repouso. Neste caso, como a fonte se encontra em movimento, a crista de cada nova onda é emitida pela fonte a uma distância  $v_F.T$  da posição correspondente à onda anterior (Salgado, 2005; Weaver, 2006).

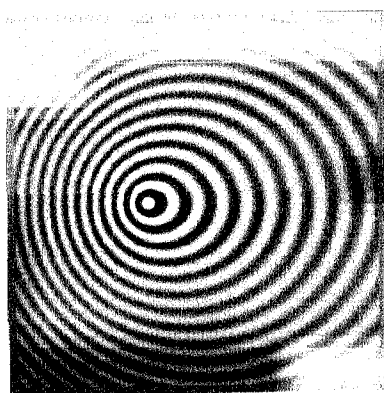
Consequentemente, o comprimento de onda medido pelo observador  $\lambda'$  será menor do que o comprimento de onda ( $\lambda$ ) que efectivamente caracteriza a onda gerada pela fonte. Assim:  $\lambda' = \lambda - \frac{v_F}{f}$ . Se tivermos em atenção que  $\lambda = \frac{v}{f}$ , então, a frequência da onda captada pelo observador na situação em que a fonte sonora se aproxima deste é dada por: (Jewett & Serway, 2002; Weaver, 2006)

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = f \left( \frac{v}{v - v_F} \right) \quad [66]$$

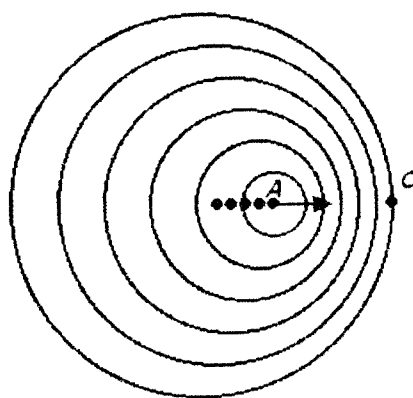
Se a fonte se afastar relativamente ao receptor então  $\lambda' = \lambda + \frac{v_F}{f}$ , o que implica que

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = f \left( \frac{v}{v + v_F} \right) \quad [67]$$

É fácil ver que a expressão [65] se obtém de [64] ao inverter o sinal de  $v_F$  (Weaver, 2006).

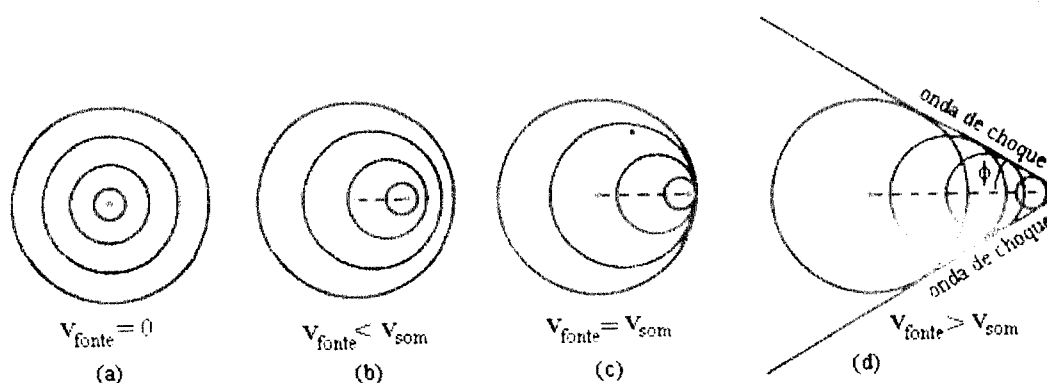


**Figura 9.33-** Visualização do Efeito Doppler num tanque de ondas.



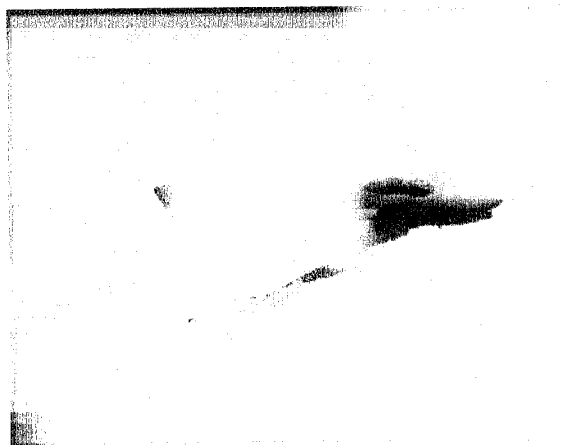
**Figura 9.34-** Movimento de uma fonte A com uma velocidade constante  $v_F$  relativamente a um observador estacionário O.

Poder-se-á, então, concluir que na situação em que a fonte geradora do sinal sonoro se aproxima do observador ocorre um aumento do valor da frequência da onda sonora captada por este, pois o número de ondas que por unidade de tempo chegam a esta posição é superior. De forma análoga, verifica-se que no caso em que a fonte se afasta do observador O que se encontra em repouso, a frequência da onda captada pelo receptor apresenta um valor inferior.



**Figura 9.35-** Representação do Efeito Doppler na situação em que a fonte e o observador se movem um relativamente ao outro.

Também pela análise das equações [64] e [65] desta equação podemos concluir que o denominador tende para zero quando o valor da velocidade com que a fonte se movimenta se aproxima da velocidade de propagação da onda, o que faz com que o valor da frequência  $f'$  tenda para infinito. Esta situação irá ter como resultado a geração de um conjunto de ondas que não conseguirão escapar à fonte geradora, resultando toda esta elevada concentração de energia numa denominada **Onda de Choque**- **Figura 9.35-(d)**. Este fenómeno pode ser observado, por exemplo, quando um avião a jacto atinge uma velocidade igual ou superior à velocidade de propagação do som no meio em causa, sendo produzido um estrondo sónico, o qual tem o aspecto de uma neblina formada por moléculas de água. Esta neblina é originada pela elevada variação da pressão devido à onda de choque, o que provoca a condensação do vapor de água presente no ar circundante (Jewett & Serway, 2002).



**Figura 9.36-** Onda de choque provocada por um avião a jacto em movimento (Tipler, 1991).

Por último, ir-se-á aqui abordar a situação em que tanto a fonte como o observador se movimentam um relativamente ao outro, sendo a frequência do som captado pelo ouvinte dada por:

$$f' = f \cdot \left( \frac{v + v_0}{v - v_F} \right) \quad [68]$$

Nesta equação, o sinal de  $v_0$  e  $v_F$  depende do sentido da velocidade da fonte e do observador. Deste modo, estas grandezas serão consideradas positivas na situação em que a fonte e o observador se aproximam, apresentando, pelo contrário, o sinal negativo para uma situação de afastamento. Em forma de síntese podemos afirmar que um movimento de aproximação se encontra associado a um aumento na frequência da onda captada pelo ouvinte, enquanto que um movimento de afastamento relativo de ambos os intervenientes se encontra associado a uma diminuição na frequência da onda captada (Jewett & Serway, 2002; Weaver, 2006).

## **9.2- Contexto problemático em estudo**

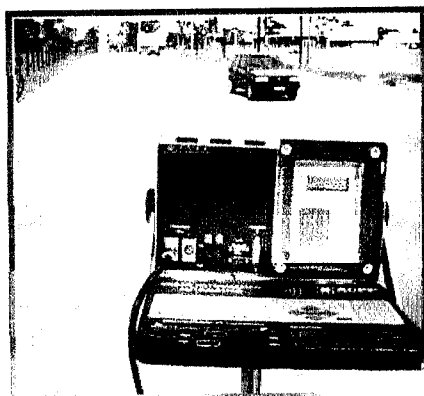
Na presente actividade será explorada uma das situações do quotidiano que se encontra relacionada com o Efeito Doppler. Esta consiste na utilização deste efeito para a construção e funcionamento dos radares policiais, os quais têm como função medir e controlar a velocidade instantânea dos veículos na via pública. Neste âmbito, e pela realização desta actividade em contexto de sala de aula, pretende-se que, entre outros objectivos, os alunos compreendam o



modo de funcionamento destes aparelhos, assim como os princípios físicos subjacentes ao mesmo.

Com o intuito de relacionar a Física com o quotidiano, ir-se-á também explorar com os alunos situações pertinentes do dia-a-dia, tais como, por exemplo:

***“Por que motivo o som de uma ambulância nos parece mais grave quando esta se afasta de nós?”***



**Figura 9.37-** Exemplo de um aparelho de radar utilizado pela brigada de trânsito na segurança rodoviária. Retirado de: <http://www.carrosnaweb.com.br/dicasradares.asp>

Na presente actividade, ir-se-á proceder ao estudo do Efeito Doppler na situação em que a fonte geradora do sinal se movimenta relativamente a um observador que permanece estacionário.

Na actividade a ser aqui realizada o observador irá corresponder a um microfone que permanecerá numa posição fixa, fazendo-se a analogia com um radar utilizado pela brigada de trânsito. Por sua vez, o papel da fonte sonora será desempenhado por um carro telecomandado, no qual se irá incorporar um altifalante que irá reproduzir uma onda sinusoidal de frequência constante gerada com recurso a um computador. Este carro irá numa primeira fase aproximar-se do microfone, passando por este num determinado instante, afastando-se em seguida do observador (o microfone) (Salgado, 2005). Deste modo, numa primeira fase da actividade, para o cálculo da velocidade com que o carro se desloca, ir-se-á utilizar a expressão [66], enquanto que numa segunda fase, que corresponde a um processo de afastamento relativo dos dois aparelhos, ir-se-á utilizar a equação dada por [67].

### **9.4.4- Objectivos propostos**

Novamente, e seguindo a estrutura das actividades anteriormente apresentadas, distinguem-se dois tipos de objectivos.

#### **9.4.3.1- Objectivos a atingir directamente pela realização da actividade**

- Verificar experimentalmente a ocorrência do Efeito Doppler;
- Compreender a utilidade do Efeito Doppler na determinação da velocidade com que um observador ou fonte geradora de ondas se desloca, através da medição da diferença entre os valores da frequência da onda emitida pela fonte e da onda detectada pelo observador na posição em que este se encontra;
- Manipular experimentalmente o conceito de frequência de uma onda sonora e compreender a informação que esta nos fornece sobre as características desta mesma onda;
- Compreender que quanto maior o número de ondas que atingem o receptor por unidade de tempo, maior será a frequência da onda recebida por este, e, consequentemente, no caso de uma onda sonora, o som recebido será mais agudo;
- Contribuir para contornar algumas concepções alternativas que poderão ser manifestadas pelos alunos, algumas das quais serão referidas e exploradas no ponto 9.4.8.;
- Inferir sobre possíveis fontes de erro inerentes às medições realizadas e que poderão ter afectado os resultados experimentais obtidos.

#### **9.4.3.2- Alguns aspectos relacionados com a realização da actividade**

- Tomar conhecimento de uma das muitas aplicações do Efeito Doppler no quotidiano;
- Compreender os princípios físicos que se encontram subjacentes ao modo de funcionamento de um radar policial;
- Relembrar os conceitos de comprimento de onda, frequência e período de uma onda.

### ***9.4.5- Material necessário***

- Microfone;
- Computador com placa de som e software de aquisição de dados (Cool Edit 2000 2000), com o qual será gerada uma onda sonora de frequência constante reproduzida pelo altifalante e registada por um microfone;
- Carro telecomandado com uma mola que quando pressionada com diferentes intensidades permite alterar a velocidade do carro. Este tipo de carros de brinquedo pode ser adquirido numa loja de brinquedos para crianças;
- Uma calha metálica com um comprimento de 4,40 m, a qual foi construída nas oficinas da escola;
- Fita métrica;
- Cronómetro;
- Altifalante de pequenas dimensões, de forma a poder ser incorporado no carro.

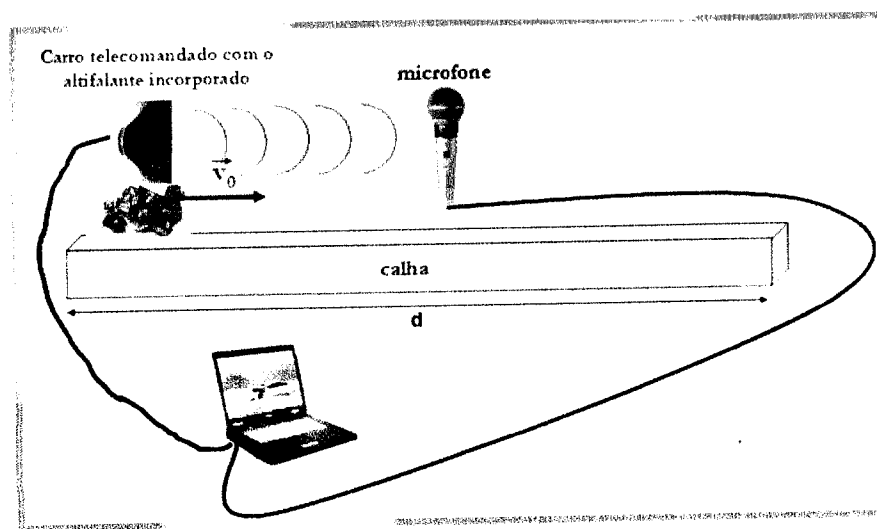
### ***9.4.6- Procedimento experimental***

Tal como já foi referido anteriormente, pretendeu-se aqui simular o modo de funcionamento de um radar policial, através do estudo das características de um sinal sonoro gerado pela sirene de uma ambulância em movimento. Para tal, utilizou-se um altifalante incorporado num veículo em movimento relativamente a um observador estacionário. O som reproduzido pelo altifalante e gerado pelo Cool Edit 2000 caracteriza-se por ser um som harmónico de frequência constante. Em alternativa, na geração do sinal sonoro poderá recorrer-se a um gerador de sinais, impondo-se apenas a condição que este som seja um sinal harmónico com um único valor de frequência.

Ao longo da actividade, realizaram-se diferentes ensaios, fazendo-se variar a velocidade com a qual o automóvel se deslocava ao longo da calha. Importante será aqui descrever de que forma esta velocidade poderá ser calculada experimentalmente, começando por referir que esta grandeza deverá, ao longo de todo o movimento do carro apresentar um valor aproximadamente constante. Para garantir um melhor controlo do valor desta grandeza optou-se por utilizar um carro telecomandado em movimento numa calha polida, a qual irá forçar o veículo a descrever uma trajectória rectilínea, com uma velocidade em boa aproximação constante. É importante

certificarmo-nos de que o movimento do carro seja o mais próximo possível do uniforme, de forma que a velocidade média calculada seja bastante próxima do valor da velocidade instantânea do automóvel.

### Montagem experimental



Para a determinação experimental de um valor médio para a velocidade com que o carro se movimenta,  $v_0$ , mediu-se a distância percorrida pelo carro e o tempo que este levou a percorrer esta mesma trajectória ao longo da calha.

É importante analisar com os alunos os resultados obtidos nos diferentes ensaios realizados, nos quais se procedeu a uma variação da velocidade do veículo, estudando os resultados e os registos sonoros obtidos em cada um dos ensaios.

Para cada ensaio realizado, procedeu-se ao estudo da variação do valor da frequência registada pelo microfone relativamente à frequência do sinal gerado ( $\Delta f$ ). Ao longo do procedimento foram efectuados ensaios em instantes bem distintos, sendo importante começar por analisar uma situação em que o veículo se aproxima do microfone e uma segunda situação em que este se afasta relativamente ao observador.

Deste modo, e recorrendo às equações [66] e [67] que correspondem, respectivamente, a uma situação em que o carro se aproxima e se afasta do microfone, foi possível determinar um valor médio para a velocidade com que o automóvel se movimenta ao longo da sua trajectória  $v_R$ , comparando este com o valor obtido experimentalmente para esta grandeza, através da utilização da equação  $v_0 = \frac{d}{\Delta t}$ .

Tendo em conta que para cada ensaio, em que se variou o valor de  $v_0$ , se realizou um registo, ao longo do tempo, das frequências do som emitido pelo altifalante e do detectado na posição onde se encontrava o microfone, então, será possível calcular para diferentes instantes a diferença entre os valores das frequências de cada um dos sinais sonoros em causa, a qual se designou por  $\Delta f$ , o que irá permitir retirar conclusões sobre o Efeito Doppler (Salgado, 2005).

#### ***9.4.7- Alguns cuidados a ter na realização desta actividade***

Antes de mais deverá ter-se o cuidado de utilizar uma calha o mais polida possível, de modo a reduzir o atrito entre o carro e a superfície de contacto, promovendo um movimento aproximadamente uniforme, ou com um valor de aceleração muito reduzido.

Por outro lado, a calha deverá apresentar um comprimento tal que, ao ser percorrida pelo veículo, seja notória uma diferença entre a frequência do som reproduzido pelo altifalante e o som captado pelo microfone. Também a velocidade com que a fonte sonora se desloca deverá apresentar um valor considerável, para que se consiga verificar a ocorrência do Efeito Doppler.

Por último, é importante que a distância do microfone à calha não seja demasiado elevada, de modo a que seja possível captar o sinal sonoro em causa, sem que se verifique uma considerável atenuação do sinal.

#### ***9.4.8- Concepções alternativas em estudo***

Ao longo desta actividade pretende-se, partindo da observação e interpretação de fenómenos que têm lugar no seu dia a dia, apresentar aos alunos um conjunto de evidências que lhes permitam refutar uma ideia que muitos poderão apresentar. Tal ideia consiste em considerar que o som produzido pela sirene de um carro de bombeiros ou uma ambulância que se desloca em serviço de urgência relativamente a nós é alterada na fonte ao longo do seu percurso, motivo pelo qual o nosso ouvido capta sons com diferentes características, sendo este som por vezes mais grave e em outras situações mais agudo.

Tendo em conta que ao longo desta actividade ir-se-á trabalhar com um microfone e um altifalante, poder-se-á aproveitar esta oportunidade para explorar algumas das ideias dos alunos sobre o modo de funcionamento destes aparelhos. Note-se que estes conteúdos são leccionados no ano em causa, aquando do estudo do fenómeno da indução electromagnética e do conceito de fluxo magnético, assim como da Lei de Faraday. Deste modo, e tendo em conta que estes conteúdos ainda não foram explorados no presente ano, será de prever que muitos alunos manifestem a ideia de que a principal função de um altifalante é gerar sons com as mais diversas características.

### ***9.4.9- Questões pré-laboratoriais***

- 1- Se ouvires com atenção o som gerado pela sirene de uma ambulância ou por um carro de bombeiros que durante o seu movimento se aproximam de ti, consegues detectar alguma alteração neste sinal?
  - 1.1- Se sim, que factor consideras responsável por esta alteração?
- 2- Em que situação este som te parece mais grave, quando o veículo se aproxima ou se afasta de ti?
- 3- Com base no procedimento experimental planeado para o estudo do Efeito Doppler, que características consideras que o som reproduzido pelo altifalante deverá apresentar?
- 4- Partindo do princípio que o som emitido pelo altifalante apresenta sempre o mesmo valor de frequência ao longo de toda a actividade, será de prever alguma variação do som captado pelo microfone à medida que o carro se desloca?
- 5- Como se poderá proceder a uma determinação da frequência do som captado pelo microfone em diferentes instantes do movimento do carro, utilizando o programa de recolha de dados Cool Edit 2000?
- 6- Admitindo que ocorre uma alteração do valor da frequência do som captado pelo microfone, em que situação, durante o movimento do carro, será de prever um valor máximo para esta grandeza?

### *9.4.10- Reflexão sobre algumas das possíveis respostas dos alunos às questões pré-laboratoriais apresentadas*

Tendo como base as questões anteriormente apresentadas, as quais serão debatidas com os alunos ao longo da realização da actividade, pretende-se, entre outros aspectos, suscitar nos alunos uma atitude de questionamento perante o procedimento a ser levado a cabo e as evidências com que estes são confrontados, assim como explorar em conjunto com estes as previsões e as hipóteses formuladas sobre os resultados a obter.

Nesta fase inicial é importante explicar aos alunos em que consiste o Efeito Doppler, dotando estes de uma base científica que lhes permita compreender e interpretar a actividade que será aqui realizada. No entanto, não se pretende numa primeira fase da aula dotar os alunos de todo o conhecimento teórico que diga respeito ao Efeito Doppler e posteriormente proceder à realização da presente actividade experimental, apresentando esta um carácter meramente demonstrativo. Pretende-se, pelo contrário, fornecer-lhes as ferramentas e os princípios básicos que lhes permitam compreender aquilo que estão a fazer e que estes consigam, num processo gradual, responder à situação-problema inicialmente apresentada.

Num trabalho prévio, o professor deverá tentar antecipar algumas das possíveis respostas dos seus alunos, para assim dispor de estratégias que permitam ultrapassar algumas das suas dificuldades, assim como assegurar uma melhor compreensão dos conceitos e um maior sucesso no processo ensino-aprendizagem. Antes de mais, é importante ter a noção de que a compreensão deste fenómeno pelos alunos não é uma tarefa fácil, pois estes mais facilmente consideram que a ambulância tem uma sirene com um som variável do que aceitam que tenha lugar uma alteração na frequência do sinal sonoro captado pelo ouvinte durante o movimento do veículo.

Será, então, de esperar que alguns alunos considerem que não ocorre nenhuma alteração na frequência do som captado pelo microfone.

Como forma de contornar esta ideia é importante analisar o registo sonoro obtido experimentalmente, levando os alunos a concluir sobre a existência de uma diferença entre o som captado pelo microfone e o som transmitido pelo altifalante, estudando e incentivando os

alunos a efectuarem previsões sobre qual deverá ser a dependência deste valor ( $\Delta f$ ) com a velocidade a que se desloca o veículo.

Deste modo, ao longo da actividade, será importante focar a atenção dos alunos no estudo de duas grandezas, nomeadamente, a intensidade do sinal sonoro captado e a sua frequência, concluindo-se que à medida que o carro se movimenta estas duas grandezas sofrem uma variação.

### ***9.4.11- Resultados obtidos experimentalmente***

Na presente actividade realizaram-se diferentes ensaios, nos quais se fez variar o valor da velocidade com que o carro se desloca ao longo da calha ( $v_0$ ). Para os diversos ensaios procedeu-se a um cálculo de um valor médio para esta velocidade, realizando-se um registo sonoro do som captado pelo microfone durante o movimento do carro. Este registo permitiu obter, para diferentes instantes, o valor da velocidade do veículo com base no Efeito Doppler ( $v_R$ ).

- ***Cálculo de um valor médio para a velocidade com que o automóvel se desloca ao longo da calha ( $v_0$ ) para cada um dos ensaios realizados:***

<b>Ensaio</b>	<b><math>\bar{d} \text{ (m)}</math></b>	<b><math>t \text{ (s)}</math></b>	<b><math>v_0 \text{ (m/s)}</math></b>
<b>1º</b>	4,40	3,61	1,22
<b>2º</b>	4,40	2,03	2,17
<b>3º</b>	4,40	1,83	2,40
<b>4º</b>	4,40	4,31	1,02
<b>5º</b>	4,40	1,86	2,36

**Tabela 9.4**



● **Cálculo de um valor para a velocidade do automóvel na calha-  $v_R$ , com base no Efeito Doppler, para cada um dos ensaios realizados.**

Tal como já foi referido, nos diferentes ensaios realizados fez-se variar o valor de  $v_0$ . Antes de proceder à apresentação dos valores obtidos para cada um dos ensaios, é importante fazer referência à simbologia utilizada para cada uma das variáveis em estudo:

$f_0$  → Frequência do som gerado pelo Software CoolEdit 2000;

$f_0'$  → Frequência do som registado pelo microfone quando o carro se encontra em repouso;

$v_0$  → Velocidade média com que o carro se desloca ao longo da calha;

$f_R$  → Frequência do sinal sonoro captado pelo microfone;

$\Delta f$  → Desvio face à frequência emitida  $f_0'$ ;

$\frac{|\Delta f|}{f_0'} \times 100$  (%) → Variação relativa da frequência do sinal registado relativamente ao valor da frequência do som gerado;

$v_R$  → Velocidade do carro calculada com recurso a [64] e [65] e tomando  $v = 344 \text{ m/s}$ ;

$\Delta v$  → Diferença entre o valor da velocidade calculado pelo Efeito Doppler ( $v_R$ ) e o valor médio medido para esta grandeza ( $v_0$ ).

**1º ensaio**

$$v_0 = 1,22 \text{ m/s}$$

	$f_0$ (Hz)	$f_0'$ (Hz)	$f_R$ (Hz)	$\Delta f = f_0' - f_R$ (Hz)	$\frac{ \Delta f }{f_0'} \times 100$ (%)	$v_R$ (m/s)	$\Delta v = v_0 - v_R$ (m/s)
Situação aproximação fonte/microfone	5000	5005,2	5022,5	-17,3	0,35	1,19	0,03
	5000	5005,2	5021,0	-15,8	0,32	1,08	0,14
	5000	5005,2	5020,7	-15,5	0,31	1,06	0,16
	5000	5005,2	5023,0	-17,8	0,36	1,22	0,00
Situação afastamento	5000	5005,2	4986,2	19,0	0,38	1,31	-0,09
	5000	5005,2	4985,5	19,7	0,39	1,36	-0,14
	5000	5005,2	4987,3	17,9	0,36	1,23	-0,01

Tabela 9.5

**2º ensaio**

$$v_0 = 2,17 \text{ m/s}$$

	$f_0$ (Hz)	$f_0'$ (Hz)	$f_R$ (Hz)	$\Delta f = f_0 - f_R$ (Hz)	$\frac{ \Delta f }{f_0} \times 100$ (%)	$v_R$ (m/s)	$\Delta v = v_0 - v_R$ (m/s)
Situação aproximação Fonte/microfone	5000	5003,7	5030,9	-27,2	0,54	1,89	0,28
	5000	5003,7	5031,4	-28,4	0,57	1,94	0,23
	5000	5003,7	5029,7	-26,7	0,53	1,78	0,39
	5000	5003,7	5033,0	-30	0,60	2,05	0,12
Situação afastamento	5000	5003,7	4972,0	31,0	0,62	2,14	0,03
	5000	5003,7	4973,0	30,0	0,60	2,07	0,10
	5000	5003,7	4972,7	30,3	0,61	2,09	0,08

Tabela 9.6

**3º ensaio**

$$v_0 = 2,4 \text{ m/s}$$

	$f_0$ (Hz)	$f_0'$ (Hz)	$f_R$ (Hz)	$\Delta f = f_0 - f_R$ (Hz)	$\frac{ \Delta f }{f_0} \times 100$ (%)	$v_R$ (m/s)	$\Delta v = v_0 - v_R$ (m/s)
Situação aproximação fonte/microfone	5000	5003,7	5038,2	-35,2	0,70	2,38	0,02
	5000	5003,7	5037,8	-34,8	0,70	2,37	0,03
	5000	5003,7	5037,4	-34,4	0,69	2,75	-0,35
Situação afastamento	5000	5003,7	4967,8	35,2	0,70	2,44	-0,04
	5000	5003,7	4968,0	35,0	0,70	3,02	-0,62
	5000	5003,7	4966,7	36,1	0,72	2,52	-0,12

Tabela 9.7

● *Análise comparativa dos resultados obtidos experimentalmente nos diferentes ensaios realizados*

Ensaio	$v_0$ (m/s)	$\bar{f}_{aprox}$ (Hz)	$\bar{f}_{afast}$ (Hz)	$\frac{\bar{f}_{aprox} - \bar{f}_{afast}}{2}$ (Hz)
1º	1,22	5021,8	4986,3	17,80
2º	2,17	5031,3	4972,6	29,35
3º	2,40	5037,8	4967,3	35,25
4º	1,02	5019,6	4987,9	15,85
5º	2,36	5038,3	4969,6	34,35

Tabela 9.8

**Em que:**

$\bar{f}_{aprox}$  → Média dos valores de frequência registados para cada um dos ensaios para uma situação de aproximação relativa da fonte e do microfone.

$\bar{f}_{afast}$  → Média dos valores de frequência registados para cada um dos ensaios para uma situação de afastamento relativo da fonte e do microfone.

Representação gráfica dos valores obtidos para  $\frac{\bar{f}_{aprox} - \bar{f}_{afast}}{2}$  em função da velocidade do automóvel ( $v_0$ )

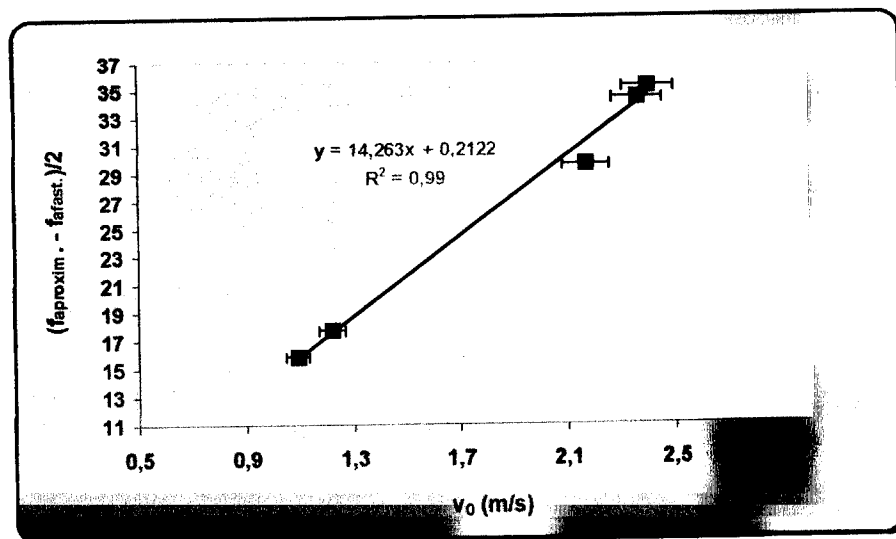


Gráfico 9.2

Com base na análise das equações [66] e [67] podemos concluir que se tivermos em conta que o valor de  $v_0$  obtido para os diferentes ensaios realizados é muito inferior ao valor da velocidade do som, então, podemos realizar a seguinte aproximação:

$$\frac{|\Delta f|}{f_0} \cong \frac{v_0}{v} \quad \text{e} \quad |\Delta f| \cong \frac{\bar{f}_{aproxim} - \bar{f}_{afast}}{2}$$

o que nos permite estimar um valor para a velocidade de propagação do som:

$$14,263 = \frac{5000}{v}, \text{ donde se obtém: } v = 350 \text{ m/s}$$

A análise dos resultados obtidos experimentalmente permite retirar um conjunto de conclusões, as quais vão de encontro às hipóteses colocadas inicialmente aquando da preparação desta actividade.

Uma primeira conclusão consiste em comprovar experimentalmente que para os diferentes ensaios realizados, durante o movimento da fonte sonora o valor da frequência do sinal sonoro registado pelo microfone apresentou um valor diferente da frequência do som gerado. Verifica-se, ainda, que para cada um dos ensaios o valor de  $f_R$  aumenta relativamente a  $f_0$  numa situação em que o veículo se desloca em relação ao microfone, diminuindo para uma situação contrária de afastamento.

Outra das variáveis importantes de analisar será a influência da velocidade a que o veículo se desloca no Efeito Doppler e no valor obtido para  $\Delta f$ . De forma a estudar esta influência, poder-se-á recorrer à análise do Gráfico 9.2, no qual é possível observar que o valor de  $\Delta f$  é tanto maior quanto maior o valor da velocidade com que o carro se desloca. Será, portanto, de prever que  $\Delta f$  tenda para zero quando a velocidade do carro tomar, também, valores próximos de zero.

Convém aqui salientar que o valor de  $v_0$  calculado para cada um dos ensaios realizados é um valor médio obtido através da equação  $v = \frac{d}{\Delta t}$ . Note-se, no entanto, que o movimento do carro na calha não é rectilíneo uniforme devido ao atrito entre existente entre as rodas do carro e a calha, podendo este em diferentes instantes alterar o valor da sua velocidade. Esta alteração, poderá justificar algumas discrepâncias obtidas nos valores calculados para  $f_R$  em cada um dos ensaios, tanto quando o carro se afastava do microfone como quando se aproximava deste.

É importante referir que, no cálculo de  $v_R$ , é necessário introduzir um valor para a velocidade de propagação do som no ar, grandeza esta que tal como já foi referido anteriormente, apresenta uma dependência na temperatura ( $v \cong 332 + 0,6t \text{ (m/s)}$ ). Desta forma, no início da actividade mediu-se um valor para a temperatura à qual se encontrava a sala de aula, o que permitiu calcular um valor médio para a velocidade de propagação do som neste meio. No entanto, note-se que o valor da temperatura deverá ter sofrido uma alteração ao longo da realização da actividade.

A determinação do coeficiente angular da recta que melhor se ajusta aos resultados experimentais (Gráfico 9.2) permite, de facto, a obtenção dum valor independente para a velocidade do som ( $v = 350 \text{ m/s}$ ), o qual pode ser comparado com  $v = 344 \text{ m/s}$ , obtido da expressão referida acima para  $t = 20^\circ \text{C}$ . É de esperar que uma repetição cuidada das medidas, envolvendo mais lançamentos (com diferentes velocidades e, portanto, mais pontos experimentais) permita reduzir consideravelmente o erro experimental envolvido e aproximar os dois valores de  $v$ .

Por último, é importante notar a discrepância verificada entre o valor da frequência do som gerado ( $f_0$ ) e do som captado pelo microfone quando o carro se encontrava em repouso relativamente ao microfone ( $f'_0$ ). A esta diferença encontra-se associado um erro sistemático que deverá prender-se com o próprio processo de registo do sinal sonoro pelo microfone.

### **9.4.12- Questões pós-laboratoriais**

- 1- Que forças actuam no carro ao longo do seu movimento e o que podemos afirmar relativamente à resultante das forças aplicadas a este?
- 2- Caracteriza o movimento do carro ao longo da calha.
- 3- Que valor experimental obtiveste para a velocidade do veículo ao longo da calha? Por que motivo este deverá ser considerado como um valor médio para esta grandeza?
- 4- Quais as principais características da onda sonora reproduzida pelo altifalante?
- 5- Comparando, para diferentes instantes do movimento do veículo, o som reproduzido pelo altifalante e o som registado pelo microfone, que diferenças, se algumas, notas entre estes sinais nas seguintes situações:

5.1- Quando o carro se aproxima do receptor.

5.2- No instante em que o carro intercepta o microfone.

**5.3- Quando o veículo se afasta relativamente ao microfone.**

- 6- Ao analisar o som registado pelo microfone, o que podemos concluir relativamente à frequência que o caracteriza?
- 7- Indica qual a relação quantitativa entre esta frequência  $f'$  e a frequência  $f$  do som reproduzido pelo altifalante nas seguintes situações:
  - 7.1- Num instante em que o carro se aproxima do microfone.
  - 7.2- Num instante em que o carro se afasta relativamente ao microfone.
- 8- Será que podes utilizar esta diferença entre as frequências do som reproduzido e captado pelo microfone de forma a estimar um valor médio para a velocidade com que o veículo se desloca ao longo da calha?
- 9- Com base no registo sonoro obtido experimentalmente, determina um valor para a velocidade do carro em diferentes instantes do seu movimento.
- 10- Compara este valor com o valor médio obtido experimentalmente para a velocidade do carro calculado na questão 3. Interpreta os resultados obtidos.
- 11- Indica possíveis fontes de erro que poderão ter afectado as medições das diferentes grandezas em estudo nesta actividade.
- 12- Ao variar a velocidade com que o veículo se desloca ao longo da calha, verificou-se alguma alteração no registo sonoro obtido? Como interpretar estes resultados?

### ***9.4.13- Algumas conclusões importantes***

Através da análise dos resultados obtidos nesta actividade, os alunos deverão ser estimulados a interpretar a diferença existente entre o valor da frequência do sinal sonoro que é reproduzido pelo altifalante e aquele que é registado pelo microfone ( $\Delta f$ ).

Um segundo ponto importante a explorar consiste em comparar o valor encontrado para a velocidade do carro, recorrendo ao Efeito Doppler, com o valor obtido experimentalmente para esta grandeza utilizando a equação  $v_0 = \frac{d}{\Delta t}$ . Ao realizar esta comparação será importante justificar possíveis diferenças que possam ser encontradas entre estes dois valores. Através de uma análise ao procedimento realizado deverá ficar claro para os alunos que, por um lado, para que seja notória uma diferença entre a frequência do sinal gerado e o sinal captado pelo microfone, é importante utilizar uma calha com um comprimento considerável. E, por outro

lado, que a velocidade ( $v_0$ ) com que o carro se desloca é proporcional ao valor obtido experimentalmente para  $\Delta f$ .

### ***9.4.14- Análise pós-aula***

#### **9.4.14.1- Caracterização da amostra e condições de realização da actividade**

A presente actividade foi aplicada a uma turma do 11º ano, constituída por vinte e dois alunos, com uma média de idades situada nos 16 anos. Refira-se que a turma apresenta um nível cognitivo bastante satisfatório, em que os alunos se mostram bastante interessados, empenhados, participativos e com um elevado interesse perante a realização de actividades experimentais. Deste modo, tal como seria de esperar, ao longo da realização da presente actividade, os alunos formularam bastantes hipóteses e colocaram algumas questões bastante pertinentes.

A presente actividade surgiu integrada no estudo do som enquanto onda mecânica. Anteriormente à sua realização, já haviam sido explorados os conceitos de amplitude, frequência, comprimento de onda, assim como o de velocidade de propagação de uma onda e de intensidade sonora. Convém, também, referir que estes alunos já realizaram a segunda actividade aqui apresentada sobre o estudo da velocidade de propagação do som, já se encontrando, por isso, familiarizados com o software de recolha de dados que será aqui utilizado.

Na realização desta actividade os alunos foram divididos em três grupos de cinco elementos e dois grupos de seis alunos, os quais se encontravam distribuídos por diferentes bancadas de trabalho. Cada grupo tinha a sua disposição um computador portátil no qual se encontrava instalado o Cool Edit, de forma a estes poderem tratar o registo sonoro obtido experimentalmente. Tendo em conta que apenas existia uma calha, então, os alunos tiveram de realizar a actividade de forma alternada, recorrendo apenas a uma montagem comum a todos os grupos. No entanto, e utilizando uma “pen disk”, os alunos conseguiram tratar em grupo, no computador que lhes foi disponibilizado, o registo do som captado pelo microfone ao longo do movimento do carro na calha.

Por último, é importante descrever de modo sumário o ambiente educativo no qual teve lugar esta actividade. Para tal, refira-se que esta actividade iria funcionar para estes alunos como um elemento de avaliação, ao contrário do que aconteceu na actividade anterior. Este

factor poderá permitir explicar o maior grau de empenho e motivação manifestado por estes, comparativamente ao que se verificou aquando da aplicação da actividade anterior a uma outra turma perante condições bem distintas. Note-se, no entanto, que este factor não constituiu um elemento inibidor para estes alunos no que respeita à sua vontade de experimentar, testar e formular questões. Mas, pelo contrário, os alunos mostraram-se bastante motivados, notando-se que o contexto problemático escolhido suscitou uma curiosidade crescente por parte dos mesmos, apesar de muitos considerarem que o fenómeno que aqui se pretendia simular e estudar em nada se relacionava com os conceitos em discussão. Note-se, também, o interesse destes alunos perante a montagem experimental a ser utilizada, mais especificamente, pela utilização de um carro telecomandado em movimento numa calha, no qual se encontrava incorporado um altifalante, encontrando-se o sistema, por sua vez, ligado a um programa de aquisição de dados.

#### **9.4.14.2- Antes de proceder à realização da actividade**

A aula teve início fazendo uma introdução à enorme diversidade de fontes sonoras existente, desde a voz humana, ao vibrar da corda de uma guitarra, ao ladrar de um cão, até ao buzinar de um carro ou à sirene de uma ambulância, referindo-se que os sons gerados por estas diferentes fontes apresentam características bem distintas, nomeadamente, no que respeita à sua altura, timbre e/ou mesmo intensidade sonora.

Os alunos foram, então, confrontados com a questão-problema já anteriormente apresentada: *“Por que motivo o som da sirene de uma ambulância nos parece mais grave quando esta se afasta de nós?”*

As respostas obtidas foram as seguintes:

- 1- *“O toque da sirene não é sempre igual, por isso, este às vezes parece mais baixo e outras vezes mais alto”- (Resposta maioritária);*
- 2- *“Porque o som afasta-se de nós, e nós não o ouvimos tão bem!” (aluno 1);*
- 3- *“O som da sirene torna-se mais fraco”;*
- 4- *“O som da sirene da ambulância quando esta passa por nós é mais intenso e agudo. Depois ao afastar-se de nós este som torna-se mais fraco e sofre distorção.” (Aluno 2);*
- 5- *“O som da sirene mantém-se inalterado, sendo sempre o mesmo toque que se repete diversas vezes, nós é que ouvimos de diferentes formas” (Aluno 3).*



Pela análise das respostas obtidas, podemos verificar que aquela que mais se aproxima do fenómeno que realmente tem lugar será a resposta 4. Numa tentativa de compreender a forma de pensar deste aluno, o mesmo foi incentivado a desenvolver a sua resposta, tendo este afirmado que quando estamos andando na rua e uma ambulância com a sirene ligada se aproxima de nós o som parece cada vez mais agudo e mais forte. Mais forte porque estando a ambulância mais perto de nós, a intensidade do sinal é superior. Acrescente-se que o aluno parecia um pouco renitente ao realizar esta afirmação, como se a considerasse fisicamente improvável, a não ser que o toque da mesma fosse alterado.

No seguimento da resposta anterior, o professor colocou a seguinte questão:

*“Admitindo que o som de uma sirene é mais grave quando a fonte sonora se afasta do ouvinte, como justificas esta situação, admitindo que o sinal emitido pela fonte não sofre alteração?”*

Começou-se por explorar conceitos base relacionados com o Efeito Doppler, nomeadamente, o de frequência de uma onda, como uma grandeza relacionada com o número de oscilações que se propagam numa determinada zona do espaço por unidade de tempo. Abordou-se, ainda, o conceito de velocidade de propagação de uma onda, discutindo a dependência desta grandeza com as características do meio em causa, concluindo com base nos resultados obtidos na actividade anterior que esta grandeza não depende da frequência da onda gerada.

Saliente-se que nesta fase os alunos ainda não possuem os conhecimentos científicos que lhes permitam responder à situação-problema inicialmente apresentada. No entanto, o principal objectivo deste questionamento consiste precisamente em realizar um levantamento das ideias prévias destes sobre uma situação que ocorre com alguma frequência no dia a dia, fazendo-os reflectir sobre a mesma, para poderem posteriormente confrontar as suas hipóteses com os resultados experimentais obtidos.

Pela análise da primeira resposta, verifica-se a existência de uma ideia prevista inicialmente, que consiste no facto de alguns alunos considerarem que ocorre uma alteração do toque da sirene pelo condutor da mesma. Por outro lado, através da análise da resposta 4 é possível verificar que alguns alunos manifestam a ideia de que, de algum modo, o som da sirene de uma ambulância, que se movimenta relativamente a eles poderá sofrer uma alteração das suas características. Por último, pela análise da resposta 5 verificamos que o aluno em questão manifesta a ideia de que de algum modo a alteração do som que nós captamos é

modificado ao nível do ouvido humano que poderá, por exemplo, distorcer sons que são gerados a distâncias comparativamente superiores. No entanto, é importante que após a realização desta actividade, fique claro para os alunos que não é o facto da fonte se encontrar mais ou menos afastada do ouvinte que leva a uma alteração do valor da sua frequência, mas sim o facto de esta se encontrar, ou não, em movimento.

Considerou-se, então, que este seria o momento da aula mais oportuno para introduzir aos alunos os princípios utilizados na construção dos radares policiais, apresentando-lhes os objectivos gerais propostos para a realização desta actividade, nomeadamente o verificar experimentalmente a ocorrência do Efeito Doppler, assim como a utilização deste, nomeadamente pelos radares policiais, para proceder ao cálculo da velocidade com que um veículo se desloca.

Saliente-se que nesta fase da aula, já após se ter procedido à exploração dos princípios base do Efeito Doppler, e ter-se chegado a um consenso de que realmente ocorreria uma alteração das características do som que chegava até ao ouvido à medida que a ambulância se encontrava mais afastada ou próxima deste, notou-se que muitos dos alunos continuavam remitentes quanto à veracidade destas afirmações, o que seria de prever, já que nenhuma evidência suficientemente consistente lhes tinha sido apresentada, de modo a fazê-los alterar as suas ideias iniciais.

Para aquele grupo de alunos que compreenderam que o som que chega até nós apresenta uma frequência diferente, pois o número de ondas que chegam até nós por unidade de tempo é sucessivamente inferior à medida que o carro se afasta, mas superior à medida que este se aproxima de nós, foi fácil responder à questão de pré-laboratório 4 (*“Com base na montagem experimental realizada para o estudo do Efeito Doppler, que características consideras que o som reproduzido pelo altifalante deverá apresentar?”*), obtendo-se as seguintes respostas:

- 1- *“A utilização de um som com um único valor de frequência permite mais facilmente concluir sobre a sua alteração”* (Aluno 2).

Por outro lado, para aqueles alunos mais confusos, nomeadamente os que consideravam que nenhuma grandeza iria sofrer alteração, verificou-se que o facto do som ser caracterizado por um só valor de frequência não era relevante para as conclusões que se pretendiam retirar. Acima de tudo, para este último grupo de alunos o som gerado não deveria ser registado a uma distância muito elevada relativamente à fonte geradora.

Saliente-se, ainda, a existência de um terceiro grupo de alunos para os quais pareceu óbvia a razão pela qual ocorria uma aparente alteração na frequência do som gerado à medida que a posição relativa da fonte e do observador ia sendo alterada.

Ao longo do debate gerado, registaram-se algumas afirmações:

- 1- *“À medida que o carro se aproxima cada vez mais do observador, o número de ondas que chega por segundo ao microfone é maior” - (Aluno 2);*
- 2- *“Quando o carro passa pelo microfone a frequência do som deve ser superior, mas também o som registado pelo microfone deve ser mais forte” (Aluno 4).*

Até ao momento e apesar de estes conceitos já terem sido leccionados, as respostas obtidas parecem demonstrar alguma confusão entre o conceito de frequência e de intensidade sonora, pois à medida que a fonte geradora se aproxima do microfone, não só a frequência do som registado toma um valor superior, como também a intensidade do sinal captado aumenta com a diminuição da distância à fonte.

Neste momento da aula, e antes de avançar para a execução da actividade, julga-se fundamental esclarecer o significado físico destes conceitos, considerando-se que em alguns dos casos, e como já foi referido em determinada altura numa actividade anterior a esta, esta dificuldade poderá estar relacionada com uma questão de linguagem. Para tal, recorreu-se a um diapasão e procedeu-se à análise em frequência do som gerado por este com a ajuda de um microfone e de um programa de aquisição de dados. Deste modo, foi possível verificar que apesar do diapasão ser tocado com diferentes intensidades, e por isso apresentar valores distintos de intensidade sonora, o valor da frequência que caracterizava o som por ele gerado não sofria alteração.

Pela análise dos resultados obtidos na realização desta actividade, convém salientar o comentário realizado por um aluno:

*“Um som com uma mesma frequência pode ser mais forte ou mais fraco, do mesmo modo que nós podemos falar mais alto ou mais baixo, sem alterar a entoação que damos às palavras” (Aluno 2).* Posteriormente, um aluno corrigiu os termos “alto” ou “baixo” por “uma voz mais forte ou mais fraca”.

Em seguida, procedeu-se à dedução das equações que traduzem o Efeito Doppler e que podem ser utilizadas para estimar um valor para a velocidade do carro, verificando-se que os alunos tiveram alguma dificuldade na sua compreensão, nomeadamente no que diz respeito ao movimento relativo dos dois sistemas.

Note-se que na presente actividade não se procedeu a um estudo exaustivo destas equações, tendo-se apenas realizado uma análise dos termos envolvidos nas mesmas e o modo como estas poderiam ser utilizadas na determinação da velocidade com que o carro se deslocava, a partir da determinação da diferença entre o valor da frequência do som gerado e do som captado pelo ouvinte estacionário.

#### **9.4.14.3- O decorrer da actividade**

Nesta fase da actividade é relevante explorar com os alunos as condições experimentais que deverão ser impostas ao sistema em estudo, de modo que se consigam cumprir os objectivos propostos inicialmente. Ao questionar os alunos sobre algumas condições que se deveriam impor à montagem experimental a utilizar, obtiveram-se respostas bastante interessantes:

1- *“O carro deve ter uma velocidade constante, porque senão o número de ondas por unidade de tempo que atingem o microfone enquanto este se desloca irá variar no tempo, consoante a velocidade do carro” (Aluno 2);*

Note-se, no entanto, que o aluno em questão não fez referência à ordem de grandeza desta velocidade, nem ao facto de que quer o carro apresente, ou não, um movimento uniforme, o número de ondas que chegam ao microfone por unidade de tempo é alterado.

2- *“O carro se se afastar muito do microfone o som ficará demasiado fraco para que possa ser detectado”;*

3- *“Se o carro se afastar muito do microfone o som torna-se demasiado fraco para que possa ser detectado e há mais interferência no microfone, sendo mais difícil medir a sua frequência.” (Aluno 1);*

4- *“A calha não pode ser muito pequena, senão não é possível detectar nenhuma diferença entre o som gerado e o som captado pelo microfone” (Aluno 3);*

5- *“O som deve ter um único valor de frequência, senão como é que vou conseguir medir alguma diferença no seu valor?” (Aluno 2).*

Ao realizar uma primeira análise às respostas acima apresentadas, é importante notar que uma grande percentagem dos alunos conseguiu facilmente identificar a maioria das variáveis que influenciam directamente a ocorrência do Efeito Doppler. Acima de tudo, estes

compreenderam que o som gerado deverá apresentar um único valor de frequência e a implicação desta condição nos resultados e conclusões que se pretendem retirar, nomeadamente, no cálculo de um valor para a velocidade do veículo.

No entanto, verificou-se que alguns alunos associam o Efeito Doppler essencialmente ao processo de atenuação do sinal e ao conceito de intensidade, pois muitos salientam o facto do som captado pelo microfone apresentar diferentes valores para essa grandeza, tornando-se mais forte ou mais fraco consoante a situação em estudo. Alguns alunos falam, ainda, em distorção do sinal captado pelo microfone.

Relativamente à referência dos alunos ao fenómeno da distorção saliente-se que estes ainda não exploraram o fenómeno da interferência, distorção, assim como o de sobreposição de duas ou mais ondas e de ruído, o que permite compreender o uso indiferenciado e incorrecto destes conceitos.

Neste momento da aula, deu-se início à execução do procedimento experimental. Antes de mais é importante descrever que ao longo de toda a fase precedente à realização da actividade os alunos mostraram-se bastante impacientes, na medida em que queriam partir o mais rapidamente possível para a realização da actividade, experimentar o programa de aquisição de dados já deles conhecido, colocar o carro a funcionar e, ao fim e ao cabo, manipular todo o material que se encontrava disponível na bancada de trabalho. Só por isso, pelo facto de se ter com esta actividade conseguido captar de tal forma a atenção dos alunos, a realização da mesma já foi bastante gratificante. Refira-se, também, que ao longo de toda a actividade existiu uma preocupação crescente em tentar associar a montagem experimental e o procedimento a levar a cabo tanto ao exemplo do toque da sirene de uma ambulância como ao estudo do funcionamento do radar policial.

Ao longo do procedimento levado a cabo registaram-se alguns comentários, hipóteses e observações dos alunos, as quais tiveram um papel muito importante, ao permitirem uma melhor compreensão. Em seguida, apresenta-se um registo de algumas destas observações as quais serão posteriormente discutidas ao longo deste trabalho.

Logo no início da execução da actividade um aluno afirmou:

- 1- *“Se determinássemos de outra forma a velocidade do carro na calha poderíamos comparar este valor com o resultado obtido pela utilização do Efeito Doppler, para assim podermos concluir se com estas equações podemos saber a velocidade do carro” (Aluno 1);*

Note-se que a exploração deste comentário permitiu levar os restantes colegas a pensar numa forma alternativa para proceder à determinação da velocidade média com que o carro percorria a calha. No entanto, era agora importante discutir com os alunos o facto deste ser um valor médio, discutindo o tipo de movimento do carro na calha.

2- *“O provável é não conseguirmos verificar nenhuma diferença na frequência do som registado, porque para isso precisávamos de realizar a medição utilizando uma calha das dimensões comparáveis à de uma estrada em que uma ambulância se movimenta, e, normalmente, as ambulâncias deslocam-se a velocidades bastante elevadas quando estão em serviço de urgência.” (Aluno 5);*

3- *“O som registado pelo microfone quando o carro se vai afastando deste é demasiado baixo para que se possa detectar uma diferença na sua frequência” (Aluno 1);*

Verifica-se que o aluno em questão ainda apresenta dificuldades em distinguir os conceitos de frequência e intensidade sonora.

4- *“Seria interessante colocar o carro a deslocar-se a diferentes velocidades para podemos verificar se isto vai provocar alguma diferença na frequência do som registado pelo microfone” (Aluno 2);*

A este respeito um aluno levantou, ainda, a seguinte hipótese:

5- *“Se o carro passar pelo microfone a uma velocidade muito reduzida, provavelmente não se irá verificar nenhuma diferença na frequência das duas ondas” (Aluno 3);*

Verifica-se que para este aluno ficou claro que a ocorrência do Efeito Doppler e a alteração da frequência do som captado pelo microfone, relativamente ao gerado inicialmente, depende da velocidade com que a fonte sonora se desloca relativamente ao observador e não só do valor da distância entre ambos.

6- *“É importante registar o tempo aproximado em que o carro passa pelo microfone, para sabermos o que aconteceu à frequência do som neste exacto momento”; (Aluno 4).*

É importante salientar que na resposta 4 surge pela primeira vez ao longo desta actividade uma relação entre a velocidade com que a ambulância se desloca com a diferença entre os valores de frequência da onda gerada e captada.

Após a finalização do procedimento experimental levado a cabo, é importante salientar algumas dificuldades sentidas pelos alunos, nomeadamente na análise dos registos sonoros obtidos experimentalmente. Desta forma, verificou-se que a principal dificuldade consistiu em escolher os intervalos de tempo em que estes iriam analisar os valores da frequência do sinal registado, de forma a que conseguissem escolher um intervalo durante o qual a frequência do sinal não sofresse uma variação significativa.

Outra das dificuldades consistiu em colocar o carro a deslocar-se com um movimento uniforme, escolhendo um valor de velocidade moderada. Os alunos tiveram, ainda, dificuldade em conseguir colocar o carro numa trajectória de tal modo que este não colidisse com as paredes da calha, existindo o menor atrito possível entre as duas superfícies em contacto.

Note-se, ainda, o comentário realizado por um aluno enquanto a actividade decorria:

- 1- *“É importante que a actividade seja realizada numa sala com o mínimo de ruído possível, ampla e com uma boa acústica, para não fazer eco” (Aluno 1).*

#### **9.4.14.4- Reflexão crítica aos resultados obtidos**

Numa primeira análise aos registos efectuados no decorrer da aula, nomeadamente algumas das intervenções dos alunos, podemos começar por verificar que muitos destes conseguiram identificar e compreender as principais ideias que aqui se pretendiam explorar, notando-se que estes colocavam hipóteses experimentais bastante consistentes.

Um ponto importante de realçar diz respeito ao elevado número de hipóteses recolhidas sobre o que acontecia ao toque de uma ambulância à medida que esta se deslocava relativamente ao ouvinte. Tal como previsto inicialmente, foram muitos os alunos que afirmaram que o facto de ouvirmos sons diferentes era resultado de uma alteração do som da própria sirene do veículo. Note-se, também, a existência de um segundo grupo de alunos que considera que a alteração do som que ouvimos se deve ao modo como o nosso ouvido capta este sinal consoante a distância a que a fonte está de nós. No entanto, o aluno em questão não fala em movimento relativo da fonte, fazendo somente referência ao valor da distância entre o emissor e o receptor. Neste grupo de alunos surge, ainda, o conceito de atenuação de um sinal sonoro.

Por último, surge por parte do **aluno 3** a ideia de que o som permanece inalterado, mas que apesar disto algum fenómeno deverá ocorrer para que este seja captado pelo ouvinte de modo diferente.

É importante aqui salientar que mesmo após se ter explorado conjuntamente com os alunos os princípios gerais subjacentes ao Efeito Doppler, colocando-se a hipótese de que não ocorria nenhuma modificação do som da sirene na fonte, muitos mostraram-se bastante renitentes sobre a veracidade da mesma. Muitos continuavam bastante convictos de que tudo poderia ser explicado pelo facto do som se tornar menos intenso, sendo consequentemente alterado ou atenuado.

Ao fazer um ponto da situação da aula até ao momento pensa-se que ao notar alguma dificuldade sentida pelos alunos na compreensão do fenómeno em estudo, o professor poderia ter recorrido a outros exemplos do dia a dia em que ocorresse o Efeito Doppler, como por exemplo o estudo da forma de propagação das ondas geradas por um barco à medida que este se desloca num rio.

Após a exploração do Efeito Doppler com os alunos, colocou-se aos alunos uma questão que iria permitir verificar o grau de compreensão destes sobre este fenómeno: *“Com base na montagem experimental utilizada para o estudo do Efeito Doppler, que características consideras que o som reproduzido pelo altifalante deverá apresentar?”*.

Pela análise das respostas obtidas, é possível identificar e agrupar os alunos consoante as respostas obtidas. Por um lado, podemos salientar aqueles alunos que ao considerarem que não iria ocorrer nenhuma alteração no som registado, a não ser que se alterasse o som gerado, então, poderia ser utilizado um som com um ou mais valores de frequência. Note-se, também, que estes alunos se mostraram, ao longo de toda a actividade, extremamente confusos com as questões colocadas e na discussão das variáveis e grandezas em estudo.

Saliente-se um segundo grupo de alunos onde se considera integrar o **aluno 1 e 4**, os quais conseguiram identificar as grandezas que variavam à medida que o carro se ia deslocando na calha.

É importante referir que ao longo de toda a actividade se recolheram afirmações dadas por um conjunto de quatro a cinco alunos, analisando a alteração, ou não, da sua forma de pensar ao longo da actividade. A escolha das mesmas deve-se, não só, ao facto destes serem bastante participativos, mas também por apresentarem uma relativa facilidade em expressar as suas ideias e opiniões. No entanto, isto não significa que outros alunos não tivessem também participado no decorrer da aula.



Pela análise das respostas dos alunos sobre as condições experimentais que deveriam ser impostas ao carro ao longo do seu movimento, obtiveram-se respostas importantes de realçar, as quais permitiram retirar algumas conclusões:

Alunos, como o **aluno 2**, conseguiram compreender que o carro deverá apresentar um movimento o mais próximo possível do uniforme. Para este aluno também é claro que a alteração da frequência do sinal sonoro deve-se ao facto do carro se encontrar em movimento, e não essencialmente ao facto deste estar mais ou menos afastado do receptor.

Também parece ter ficado claro, após a realização da actividade com o diapasão, que para além de ocorrer o Efeito Doppler, o qual é responsável pela alteração da frequência do sinal recebido, ocorre também uma atenuação do mesmo, fenómeno este que poderá aumentar consideravelmente se a distância entre o emissor do sinal e o receptor for demasiado elevada.

Podemos, ainda, identificar um segundo grupo de alunos que associa o Efeito Doppler essencialmente ao processo de atenuação do sinal sonoro. Para estes, parece transparecer a ideia de que o Efeito Doppler consiste essencialmente numa alteração das características do sinal devido à distância entre o emissor e o receptor e uma consequente atenuação do sinal em causa. No entanto, note-se que para estes diferentes grupos de alunos, pareceu ter ficado esclarecido que não se verifica uma alteração nas características do sinal sonoro produzido na fonte e que, as diferenças verificadas decorrem do facto da ambulância se encontrar em movimento.

Também é importante salientar que o facto de os alunos ainda não terem leccionado os fenómenos envolvidos na distorção, interferência, ruído e atenuação de um sinal sonoro poderá, de algum modo, ter dificultado a compreensão por parte destes do Efeito Doppler. Este talvez, tenha sido um dos factores que contribuiu para alguma da confusão que se verificou ao longo da actividade a propósito de alguns conceitos implícitos na mesma.

Relativamente à execução da actividade é de salientar a importância da afirmação realizada pelo **aluno 1**: *“Se determinássemos de outra forma a velocidade do carro na calha poderíamos comparar este valor com o resultado obtido pela realização do Efeito Doppler, para assim podermos concluir se com estas equações podemos saber a velocidade do carro”*.

A relevância deste comentário prende-se com o facto de ter permitido aos restantes alunos compreender que utilizando o Efeito Doppler e a diferença entre a frequência do som gerado e captado pelo microfone, seria possível estimar um valor para a velocidade do carro ao longo da calha.

Analise-se, também, a hipótese colocada pelo **aluno 5** que considera que o Efeito Doppler apenas tem lugar se a fonte do sinal se movimentar a uma velocidade considerável. Talvez esta afirmação pudesse ter sido melhor explorada, discutindo com este aluno qual a influência da velocidade de propagação da frente de onda no valor de  $\Delta f$ , o que poderia ter sido realizado pela análise das equações [66] e [67].

Por outro lado, e ao analisar a resposta dada pelo **aluno 3** (*“Se o carro passar pelo microfone a uma velocidade muito reduzida, provavelmente não se irá verificar nenhuma diferença na frequência das duas ondas.”*), pode-se concluir que este compreendeu a relação existente entre o Efeito Doppler e a velocidade a que se desloca a fonte.

No entanto, foi possível verificar que ao longo da realização da actividade alguns alunos sentiram alguma dificuldade em identificar as variáveis que influenciavam o valor de  $\Delta f$ , assim como na previsão dos resultados a serem obtidos em cada uma das situações experimentais em estudo.

No que se refere à fase de análise dos resultados obtidos experimentalmente, verifica-se que muitos dos alunos conseguiram compreender os objectivos gerais propostos para a mesma, comparando para diferentes valores de  $v_0$  o valor da frequência do som gerado com o do som captado pelo microfone, tirando conclusões sobre a variação, ou não, do valor de  $\Delta f$  à medida que estes aparelhos se iam aproximando e afastando a velocidade aproximadamente constante.

#### **9.4.14.5- Principais conclusões sobre o decorrer da actividade**

Ao analisar numa perspectiva abrangente o decorrer desta actividade é importante salientar alguns aspectos tidos como positivos, assim como apontar as principais dificuldades sentidas e alguns aspectos que poderiam ser melhorados e mesmo modificados numa aplicação futura.

Antes de mais, é importante começar por fazer um balanço global sobre a aplicação desta actividade, discutindo o contexto escolhido, as questões que foram colocadas ao longo da actividade, o modo como a discussão foi orientada, passando por uma reflexão sobre o procedimento levado a cabo, se foi ou não o mais apropriado, até à discussão dos resultados obtidos. Por último, é essencial reflectir se os alunos aprenderam com a realização da mesma, as dúvidas e questões que ficaram por resolver, ou mesmo algumas das principais dificuldades que ficaram por superar.

Neste âmbito, note-se que apesar de a realização desta actividade ter suscitado muita curiosidade na maioria dos alunos, considera-se que, com excepção de alguns alunos que ao longo da actividade foram identificando com relativa facilidade as variáveis em estudo, a maioria dos alunos manifestou uma dificuldade acrescida em diferentes fases da implementação da actividade, podendo aqui apontar-se algumas destas dificuldades.

Comece-se por apontar a dificuldade na compreensão de que um som poderia alterar a sua frequência em virtude de uma fonte geradora em movimento fazer variar o número de ondas captadas ao longo do tempo por um ouvinte em repouso. Outra das dificuldades consistiu em distinguir os conceitos de intensidade sonora e de frequência, apesar de se julgar que esta dificuldade foi significativamente contornada depois de realizar a actividade com o diapasão.

Outra das dificuldades consistiu em compreender que o Efeito Doppler não ocorria somente pelo facto dos dois aparelhos em questão se encontrarem mais ou menos afastados um do outro. Ou seja, que esta não era condição suficiente e única para a ocorrência deste fenómeno. Este facto poderá estar, também, relacionado com a dificuldade de alguns alunos em compreender a dedução das equações [66] e [67] relativas ao Efeito Doppler.

Por último, e relacionado com a interpretação dos resultados obtidos experimentalmente, é importante referir que alguns alunos tiveram dificuldade na compreensão de que a frequência aparente de uma onda captada por um aparelho pode variar sem que se tenha obrigatoriamente de alterar na fonte as características do som gerado.

Note-se que, de um modo geral, os alunos compreenderam os princípios gerais relacionados com o Efeito Doppler, manifestando, no entanto, dificuldade em aceitar que esse fenómeno pode ocorrer nas mais diversas situações. De modo a contornar esta situação, poder-se-iam ter dado exemplos de outras situações em que este fenómeno tem lugar.

Por outro lado, é importante comentar que apesar de inicialmente se pretender estudar o Efeito Doppler associado ao funcionamento dos radares policiais, acabou por se centrar mais o estudo deste fenómeno na análise das características da sirene de uma ambulância em movimento. Talvez porque ao explorar este exemplo, seriam apresentadas aos alunos evidências palpáveis. No entanto, no final da actividade teria sido importante tentar relacionar os resultados obtidos experimentalmente com o funcionamento dos radares e a determinação da velocidade com que um veículo se desloca na via pública.

Quanto aos objectivos iniciais propostos para esta actividade, pode-se afirmar antes de mais que, mesmo os alunos que consideravam que não se verificaria nenhuma alteração na

frequência do sinal captado pelo microfone, conseguiu-se apresentar provas consistentes que lhes permitiram alterar as suas ideias iniciais.

Considera-se, também, que uma grande maioria dos alunos conseguiu compreender a utilidade do Efeito Doppler na determinação da velocidade com que um veículo se desloca. Para tal, foi importante manipular o conceito de frequência e de intensidade sonora, apesar de se considerar que, mesmo após a actividade ter sido dada como finalizada, alguns alunos poderão continuar a confundir estes conceitos, quando forem estimulados a aplicá-los em outras situações do quotidiano.

Quanto à compreensão do Efeito Doppler, consideramos que apenas uma minoria dos alunos compreendeu efectivamente o que fazia com que um som gerado por uma fonte em movimento pudesse parecer-nos mais grave ou mais agudo, identificando a influência neste efeito da velocidade com que uma fonte se desloca, assim como da distância relativa entre o receptor e o gerador do sinal.

Notou-se, também, que alguns alunos, apesar de compreenderem o Efeito Doppler, manifestam a ideia de que este fenómeno apenas poderá estar associado a sistemas que se deslocam a velocidades consideráveis, como, por exemplo um comboio que se movimenta relativamente a um passageiro em repouso numa estação.

#### **9.4.14.6- Algumas sugestões para futuras aplicações**

Por último, é importante apontar alguns aspectos que podem ser passíveis de alteração aquando de uma futura aplicação desta actividade em sala de aula. Antes de mais, deverá tentar-se explorar com maior profundidade qual a implicação do valor da velocidade com que um veículo se desloca no valor de  $\Delta f$ . Para tal, poder-se-á, por exemplo, realizar um maior número de ensaios experimentais, nos quais o veículo em causa apresente valores bastante distintos para a sua velocidade.

Por outro lado, e tal como já foi referido, seria importante apresentar aos alunos outros exemplos do dia-a-dia em que se verifique a ocorrência do Efeito Doppler. Ao fazer isso, pretende-se não só que os alunos tomem conhecimento da importância deste fenómeno, como também que fiquem com a noção de que este efeito não aparece apenas associado às ondas sonoras, mas também às ondas electromagnéticas, ou mesmo às ondas que se propagam num líquido.

Por último, talvez se pudesse ter evidenciado mais o facto de que o Efeito Doppler não ocorre apenas na situação em que a fonte geradora de ondas se movimenta relativamente a um observador estacionário. Mas que, pelo contrário, também se verifica este fenómeno quando é o observador que se movimenta relativamente a uma fonte em repouso, ou, ainda, na situação em que ambos se encontram em movimento.

Em forma de conclusão, pode-se afirmar que a aplicação desta actividade foi, por um lado, bastante vantajosa ao permitir compreender muitas das dificuldades e ideias prévias dos alunos sobre este fenómeno, tornando-se extremamente interessante decifrar a forma de pensar dos mesmos. No entanto, e ao analisar muitas das respostas recolhidas, surgiram muitas dúvidas e por vezes curiosidade sobre muitas das ideias que poderiam estar por detrás de algumas destas afirmações.

## **Capítulo 10**

### *Conclusões gerais sobre o trabalho realizado*

Após se ter procedido à aplicação do conjunto de actividades sobre a temática de Ondas e Som, é importante realizar um balanço global à eficácia das estratégias utilizadas, apontando os pontos positivos que resultaram desta aplicação, assim como apresentar sugestões para a utilização desta metodologia no futuro. Muitas das conclusões que nos foi possível retirar advêm do questionamento levado a cabo nas diferentes fases da aplicação desta metodologia, tanto na fase de pré-laboratório, como durante o procedimento experimental, ou mesmo na interpretação dos resultados obtidos experimentalmente.

Uma primeira conclusão é que o clima de debate proporcionado e a abertura dada aos alunos para que estes colocassem as suas dúvidas e expressassem as suas ideias foi extremamente vantajoso, ao permitir ao professor explorar algumas das formas de pensar destes alunos, tentando compreender as suas dificuldades, tanto a nível conceptual, como processual. Por outro lado, no fim de cada actividade, os alunos foram colocados perante novas situações do dia a dia, sendo assim obrigados a testar os novos conhecimentos, e permitindo verificar se tinham realmente alterado algumas das ideias com que chegaram à sala de aula, contornando as suas concepções sobre determinado conceito ou fenómeno.

Nesta análise, não se poderá deixar de referir que, nas três actividades realizadas, muitos foram os alunos que mostraram ter mantido na sua estrutura de conhecimentos as ideias com que chegaram à sala de aula, mesmo após estes terem sido confrontados com evidências experimentais que as permitiriam, supostamente, refutar. A verificação da ocorrência de situações como estas permite pensar sobre estratégias a utilizar como recurso ou alternativa, as quais foram discutidas aquando da reflexão realizada no final de cada uma das actividades.

É no entanto importante sistematizar algumas destas dificuldades, na medida em que surgiram com alguma frequência, e foram detectadas em mais do que uma actividade. Saliente-se, por exemplo, o facto de muitos alunos continuarem a confundir com alguma frequência os conceitos de amplitude sonora e de frequência, utilizando, por exemplo, a expressão "*Um som mais alto*" quando se querem referir a um som mais intenso. É também frequente a ideia de que a velocidade de propagação de um sinal sonoro depende do valor da frequência que o caracteriza, assim como da sua intensidade sonora, e não apenas das características do meio no qual este se propaga. Estas ideias foram detectadas tanto na aplicação da primeira actividade aqui apresentada, como também nas duas seguintes, apesar destas serem dirigidas a níveis de ensino distintos.

Uma outra ideia presente nas três actividades realizadas tem a ver com um certo misticismo relacionado com o processo de captação de um sinal sonoro pelo ouvido humano, processo este que permite distinguir a voz de diferentes pessoas, os sons emitidos por diferentes animais, e, de um modo geral, o som gerado por diferentes fontes sonoras. Entre outras afirmações registadas durante a realização das diferentes actividades, pode referir-se, por exemplo, que na actividade do Efeito Doppler, alguns alunos, ao serem questionados sobre o que acontecia e permitia explicar a alteração das características do sinal sonoro captado por um ouvinte estacionário à medida que a fonte sonora se aproximava ou afastava dele, afirmaram que a explicação residia precisamente no facto de o nosso ouvido “*Ouvir de diferentes formas*” ou ainda “*De que não ouvíamos do mesmo modo*”. Na primeira actividade um aluno chega mesmo a afirmar que “*Ouvimos melhor na Terra do que na Lua*” ou que “*O nosso ouvido é mais eficaz na Terra*”.

Uma forma de tentar decodificar estas ideias, explorando os fenómenos que têm lugar no ouvido humano, poderá passar por usar este contexto como ponto de partida para o estudo de fenómenos de ressonância. É esta uma sugestão para a um possível trabalho futuro. Poder-se-á começar por estudar os modos de vibração das cordas de uma guitarra, analisar a forma como o tímpano capta sons com diferentes características, ou ainda, discutir o modo de funcionamento de um altifalante. Os fenómenos de ressonância podem assim ser estudados nos mais diversos contextos, obtendo-se, com certeza, respostas bastante interessantes, que poderão contribuir para clarificar algumas das ideias dos alunos sobre este tema.

Por último é importante referir o gosto que foi elaborar um trabalho com estas características, construir todos os recursos materiais a serem utilizados em cada uma das actividades realizadas, e, ainda, explorar as potencialidades do software computacional utilizado nestas, nomeadamente na análise de sons com as mais diversas características, gerados por diferentes fontes. Por outro lado, da parte dos alunos, notou-se, com muito agrado, a sua satisfação e motivação, evidenciadas ao longo da aplicação de cada uma das actividades propostas; isto talvez consiga ser explicado pelo facto destes terem desempenhado um papel activo no funcionamento e na dinâmica da aula, colaborando na obtenção dos resultados experimentais, na manipulação do material colocado à sua disposição e na escolha do procedimento que julgavam mais adequado, podendo reformular o mesmo quando tal se julgasse necessário. Existiu, ainda, um espaço para estes exporem as suas ideias, dúvidas e partilharem opiniões.



Julga-se, assim, ter contribuído para uma forma de ensinar Ciência cada vez mais interessante e eficaz, levando os alunos a questionar-se sobre diferentes fenómenos físicos, sobre as suas próprias ideias e, de um modo geral, sobre muitas das situações que têm lugar no seu dia a dia. Este questionamento deverá ser acompanhado de uma acção investigativa, na procura de respostas às suas dúvidas, confirmando ou refutando algumas das suas ideias e hipóteses, perspectivando o método científico e a obtenção do conhecimento científico como um processo de “tentativa-erro”.

De um modo geral, considera-se que se conseguiu, através da realização desta dissertação, cumprir a maioria dos objectivos inicialmente propostos. E porque este é um trabalho de alguma forma inacabado, espera-se que as actividades aqui apresentadas e as experiências educativas partilhadas possam, de algum modo, ser úteis a outros professores na elaboração de novas actividades, dando-lhes a conhecer os sucessos de algumas das estratégias aqui utilizadas, como também ajudá-los a precaver-se relativamente a algumas das dificuldades com que se poderão deparar, indicando, ainda, possíveis formas de as ultrapassar.

# *Apêndices*

## Apêndice 1

### A propagação do som

#### Ficha de apoio à realização da actividade

Nome do aluno: \_\_\_\_\_

*Já deverás saber que...*



As ondas sonoras, as quais podem ser geradas pelas mais diversas fontes, desde a vibração da corda de uma guitarra à vibração das nossas cordas vocais, enquanto ondas mecânicas, apresentam um conjunto de propriedades que as permitem caracterizar e distinguir de outros tipos de ondas, como por exemplo as ondas que se geram quando atiramos uma pedra a um lago, ou as ondas electromagnéticas.

Através da realização desta actividade pretende-se investigar o modo de propagação do som no ar, de forma a podermos responder à seguinte questão:

*Porque podemos enviar uma sonda para Marte, a qual nos irá permitir ouvir os sons neste planeta, e pelo contrário, se enviarmos uma sonda para a Lua, esta não irá permitir ouvir os sons na Lua?*

#### Material de que precisas:

- Uma campânula;
- Um computador com programa de aquisição de dados- Cool Edit 2000;
- Um microfone;
- Um altifalante ligado ao computador;
- Bomba de vácuo.

#### Alguns procedimentos importantes que deverás ter em atenção

- 1- Recorrendo ao software Cool Edit 2000 gera um som de frequência constante.
- 2- No interior da campânula coloca um microfone ligado a um computador, de forma a procederes ao registo do som reproduzido pelo altifalante.
- 3- Utilizando uma bomba de vácuo, numa primeira fase será retirado gradualmente o ar presente na campânula e em simultâneo registado o som captado.
- 4- Após teres retirado o máximo de ar do interior da campânula e realizado os respectivos registos utilizando o Cool Edit 2000, irás numa segunda fase e de uma forma gradual, deixar entrar o ar na campânula, registando novamente o som propagado no interior da mesma.

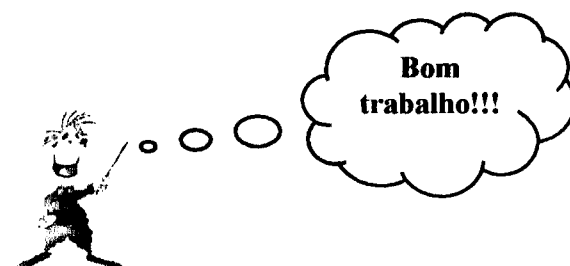
**ATENÇÃO!** Tenta isolar, o melhor possível, o sistema campânula+microfone+altifalante do meio circundante.





*Ao analisar os resultados obtidos...*

- 1- O que aconteceu à amplitude do som registado pelo microfone à medida que o ar foi sucessivamente retirado da campânula? Como justificas este facto?
- 2- Recorrendo à análise em frequência deste som, se comparares o som emitido pelo altifalante com o som recebido pelo microfone, ao longo da actividade, que podes afirmar relativamente às frequências que os caracterizam?
- 3- Com base nos resultados que obtiveste, e se pudesses repetir a actividade, alterarias algum passo no procedimento levado a cabo?
- 4- Se em vez de um altifalante, se colocasse uma lanterna no interior da campânula e se procedesse de forma idêntica, o que previas que acontecesse? Haveria alguma alteração no brilho da lâmpada?



## Apêndice II

### *Determinação da velocidade de propagação do som no ar*

#### Ficha de apoio à realização da actividade

Nome do aluno: \_\_\_\_\_

*Já deverás saber que....*



O som, enquanto onda mecânica, necessita de um meio para se poder propagar, sendo que a velocidade com a qual esta se propaga depende das propriedades do meio em questão.

Através da realização desta actividade pretende-se determinar um valor experimental para a velocidade de propagação do som no ar, tendo em atenção as condições experimentais nas quais a actividade é realizada, inferindo sobre a influência, ou não, destas mesmas condições no valor obtido para a grandeza em estudo.

#### *Material de que precisas:*

- Duas mangueiras com comprimentos distintos;
- Um computador com programa de aquisição de dados- Cool Edit 2000;
- Um microfone;
- Diferentes materiais para gerar impulsos com diferentes características.

#### *Alguns procedimentos importantes que deverás ter em atenção*

- 1- Utilizando materiais diferentes gera impulsos curtos à entrada da mangueira.
- 2- Com um microfone regista o impulso sonoro à entrada da mangueira e à saída da mesma.
- 3- Efectua as medições necessárias para calcular um valor experimental para a velocidade de propagação do som.
- 4- Utilizando as mesmas fontes sonoras, gera sons com diferentes intensidades e procede de forma idêntica.
- 5- Repete os passos acima descritos, mas utilizando uma mangueira com um comprimento diferente.



**ATENÇÃO!** Tenta gerar o som o mais próximo possível do funil e não te esqueças de medir a temperatura à qual se encontra o meio no qual é realizada a actividade.

*O que prevês que aconteça?*

- 1- Existirá alguma diferença entre o instante em que é gerado o impulso sonoro em estudo e o do registo do som à saída da mangueira?
- 2- Existirá alguma diferença entre os tempos registados para o caso de um bater de palmas e para o som gerado pelo bater de duas estacas metálicas?
- 3- De que forma se pode determinar experimentalmente a velocidade de propagação do som no ar?
- 4- Que efeito, se algum, terá a utilização de uma mangueira de maiores dimensões?

*Ao analisar os resultados obtidos...*

- ➡ 1- Interpreta o registo sonoro obtido experimentalmente, identificando o significado físico de uma subida da intensidade sonora registada quando decorrido algum tempo após a geração do impulso sonoro em estudo.
- ➡ 2- Que parâmetro pode ser alterado de forma a provocar uma variação no intervalo de tempo que decorre desde a geração do impulso e a detecção deste à saída da mangueira? Será que o valor da velocidade é alterado com a variação deste parâmetro?
- ➡ 3- Qual a influência da variação desta grandeza na amplitude do sinal detectado à saída da mangueira? Existem outras formas de alterar a amplitude do sinal detectado à saída?
- ➡ 4- Que efeito teria, se algum, a variação da temperatura nas grandezas medidas experimentalmente?



***Bom trabalho!!!***

## *Apêndice III*

### *Investigando o Efeito Doppler...*

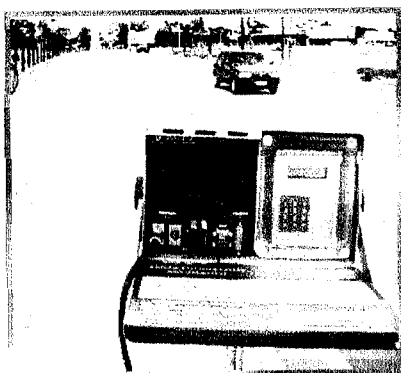
#### **Ficha de apoio à realização da actividade**

Nome do aluno: \_\_\_\_\_

*Já deverás saber que....*

Em 1942 Christian Doppler verificou experimentalmente que a frequência de um som sofre uma alteração quando a fonte emissora se movimenta relativamente ao observador. Este efeito poderá ser verificado em diversas situações do dia a dia, como por exemplo quando ouvimos uma ambulância a movimentar-se relativamente a nós ouvintes, e analisamos o som da sua sirene na situação em que esta se aproxima de nós e em que se afasta. Este efeito apresenta diversas aplicações, entre elas o funcionamento do radar policial, utilizado pela brigada de trânsito para o controlo de velocidade.

Nesta actividade experimental pretende-se investigar o modo de funcionamento do radar policial, relacionando-o com o efeito Doppler.



#### *Material de que precisas:*

- Microfone;
- Um computador com programa Cool Edit 2000;
- Digitímetro e células fotossensíveis;
- Carro;
- Fita métrica;
- Cronómetro;
- Altifalante.

#### *Alguns procedimentos importantes que deverás ter em atenção*

- 1- Incorporar um altifalante num veículo que se movimenta relativamente a um observador (microfone).
- 2- Reproduzir no altifalante um som harmónico de frequência constante.
- 3- Fazer o carro movimentar-se a diferentes velocidades e planear com o material disponível uma forma de medir experimentalmente a velocidade média com que o carro se desloca.
- 4- Recorrendo à utilização do microfone efectuar um registo da frequência do som emitido pelo altifalante e detectado pelo microfone e comparar ambos os registos sonoros para diferentes posições do altifalante relativamente ao microfone, ou seja, em diferentes instantes.
- 5- Calcular com base nesta diferença de frequências um valor para a velocidade com que o veículo se desloca e comparar este valor com o obtido experimentalmente.

*O que prevês que aconteça?*

- 1- Se ouvires com atenção o som de uma sirene de uma ambulância ou de um carro dos bombeiros em movimento, à medida que estes se aproximam de ti, verificas alguma alteração no som emitido? Que factores consideras como responsáveis por esta alteração?
- 2- Em que situação este som te parece mais grave? Quando o veículo se aproxima ou se afasta de ti?
- 3- Partindo do princípio que o som emitido pelo altifalante apresenta sempre a mesma frequência, como prevês que varie a frequência registada pelo microfone ao longo do movimento do carro na calha?
- 4- Em que situação a frequência do som captado pelo microfone será superior? Num instante em que este se encontra mais afastado do microfone, ou, pelo contrário, na situação em que este se encontra mais próximo? Justifica.
- 5- Será que podes utilizar esta diferença entre as frequências do som reproduzido e captado pelo microfone na determinação da velocidade com que se desloca o veículo?

*Ao analisar os resultados obtidos...*

- 1- Comparando, para diferentes instantes, o som reproduzido pelo altifalante e o som registado no microfone que diferenças, se algumas, verificas entre ambos nas seguintes situações:
  - 1.1- Quando o carro se aproxima do microfone.
  - 1.2- No instante em que o carro passa no ponto mais próximo.
  - 1.3- Quando o carro se afasta do microfone.
- 2- Com base no registo sonoro obtido experimentalmente, determina um valor para a velocidade do carro em diferentes instantes do seu movimento.
- 3- Compara este valor com o valor médio obtido para a velocidade do carro e tira as respectivas conclusões.



## *Lista de referências*

### *Referências Bibliográficas*

- ADAMS, A.D. & CHIAPPETTA, E.L. (2004). The Science Teacher- Multicultural Science, *Inquiry-Based- Understanding how content and process go hand-in-hand with school science*. Volume 71- Nº2.
- ALONSO, Marcelo *et al.*, (1977). *Física*, Volume II, Brasil, Editora Edgard Blucher, Ltd.
- AMBRUSO, M.D., (2003). The Science Teacher, *Challenging Students with Experiments- Incorporating scientific investigations in the busy classroom*. Volume 70- Nº 1.
- BARTON, E.H., (1914). *A Text-Book on Sound*, London, Macmillan and Co., Limited.
- BELL, R.L. & MICHAELS, E., (2003). The Science Teacher- Exploring Evolution, *The Nature of Science & PERCEPTUAL FRAMEWORKS- Emphasizing a more balanced approach to science instruction*. Volume 70- Nº8.
- BELLO, A. & CALDEIRA, H. (2005). Manual de Física: *Ontem e Hoje- Física e Química A*, 11º ou 12º ano. Porto: Porto Editora
- CALDEIRA, M.H. *et al* (1991), *Gazeta de Física, Ideias dos alunos sobre o conceito de som*, 14, 22-32.
- CHIN, C., (2003). The Science Teacher, *Success with Investigations- Strategies for facilitating student science investigations*. Volume 70- Nº2.
- CROWELL, B., (1999). *Vibration and Waves*. 2ª Edição, Califórnia.
- DEUS, Jorge Dias de *et al* (2000). *Introdução à Física*, 2ª Edição, Lisboa, McGraw-Hill.
- DIAS, J.T. (1998), *Comunicar Ciência, O ensino experimental em Química*, Ano I- Nº1- Outubro/Dezembro.
- EVEREST, F.A., (2001). *Master Handbook of Acoustics*, 4th Edition, New Work, McGraw-Hill.
- FEYNMAN, R. P., (1977). *The Feynman Lectures on Physics*, 6<sup>th</sup> Edition, USA, Addison-Wesley.
- FREEDMAN & YOUNG, (2003). *Física II, Termodinâmica e Ondas*, 10ª Edição, São Paulo: Pearson Addison Wesley.
- GERKING, J.L., (2004). The Science Teacher, *Opening the Door to Science*. Volume 71- Nº2.

- HALLIDAY, David *et al.*, (1978). *Physics*, New York, John Wiley & Sons, Inc.
- JEWETT, Jr. & SERWAY, R.A. (2002). *Princípios de Física- Movimento Ondulatório e Termodinâmica*, Volume II, São Paulo, Thomson Learning.
- KINSLER, L. *et al.*, (1976). *Fundamentals of Acoustics*, USA, John Wiley & Sons, Inc.
- MARQUES, L. & PRAIA, J., (1998), *Comunicar Ciência, O Trabalho Laboratorial (TL) em Geociências*, Ano I- Nº1- Outubro/Dezembro.
- MATEUS, A.,(2000). *Comunicar Ciência, Sismos*. Ano I- Nº4- Março/ Maio.
- MORSE, Philip M., (1948). *Vibration and Sound*, 2<sup>nd</sup> Edition, USA, McGraw-Hill.
- NOBRE, A., (1998). *Comunicar Ciência, Sobre o Ensino "Experimental" na Biologia*, Ano I- Nº1- Outubro/Dezembro.
- OHANA, C., (2006). *Science and Children, Research and Tips to Support Science Education, Defending Inquiry*.
- RAICHEL, D.R., (2000). *Modern Acoustic And Signal Processing, The Science and Application of Acoustics*. Physics Department, Brown University, New York, INC.
- RUTHERFORD P.M. *et al.*, (2003). *The Science Teacher, High Schoolers in Motion, Imparting Newtonian knowledge to elementary students*. Volume 70-Nº5.
- SALGADO, M. M., (2005). *Ondas sonoras. Experiências do Quotidiano*, Tese de Mestrado em Física para o Ensino. Departamento de Física, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.
- TIPLER, P., (1991). *Física*, Volume 2, Rio de Janeiro, Editora Guanabara Koogan S.<sup>a</sup>.
- VALADARES, J. *et al.*, (1987). *Manual de Física, 12ºano de escolaridade*, Volume II, 2ª Edição, Lisboa, Didáctica Editora.
- VALADARES, J., (s.d.). *Universidade Aberta, Estratégias Construtivistas e Investigativas no Ensino das Ciências*.
- VIANA, I. M., (2005). *Fundamentos Físicos do Som*. Tese de Mestrado em Física para o Ensino, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.
- WARREN, P., (1991). *Physic Alive*, London.
- WEAVER, N., (2006). *School Science Review, Physics outdoors: from the Doppler effect to  $F = m.a$* , 87 (320).
- WILLIAM, B. *et al.*, (1894). *The Tutorial Physics, A TEXT-BOOK OF SOUND*, Volume I. 2<sup>th</sup> Edition, The University Tutorial Series, London.

## *Endereços da Internet consultados*

[http://www.citi.pt/estudos\\_multi/pedro\\_duarte/30.html](http://www.citi.pt/estudos_multi/pedro_duarte/30.html)

<http://www.essi.fr/~leroux/crim2/img4sinus.gif>

<http://www.essi.fr/~leroux/crim2/img4sinus.gif>

<http://www.mspc.eng.br/clemag/opt2A.asp>

<http://colfem.com/Webfisica/vibraciones.htm>

<http://www.gnresound-group.com/lossandcare/encyclopedia/amplitude.htm>

<http://html.rincondelvago.com/absorcion-de-ondas-sonoras.html>

<http://html.rincondelvago.com/absorcion-de-ondas-sonoras.html>

[http://domingos.home.sapo.pt/estruterra\\_2.html](http://domingos.home.sapo.pt/estruterra_2.html)

[http://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito\\_Doppler](http://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_Doppler)

<http://www.if.ufrj.br/teaching/fis2/oscila/oscilacoes.html>

<http://www.physicsclassroom.com/>

[http://www.lip.pt/~outreach/experiments/waves\\_pt.html#travelling](http://www.lip.pt/~outreach/experiments/waves_pt.html#travelling)

<http://earthquake.usgs.gov/learning/students.php?sendLevelID=9>

Faculdade de Ciências do Porto
Biblioteca do Departamento de Física